

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO MECÁNICO E INGENIERA MECÁNICA**

**TEMA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS  
TRITURADOR DE 15 qq/h DE MINERAL PÉTREO PARA PRODUCIR  
BIOFERTILIZANTES**

**AUTORES**

**JONATHAN VLADIMIR MÉNDEZ ANDRADE**

**ANDREA ELIZABETH ORELLANA CHIRIBOGA**

**TUTOR**

**QUITIAQUEZ SARZOSA RENE PATRICIO**

**Quito, agosto de 2018**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Jonathan Vladimir Méndez Andrade con documento de identificación N°1724585888 y Andrea Elizabeth Orellana Chiriboga con documento de identificación N°1718213927, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: Diseño y construcción de un molino de martillos triturador de 15 qq/h de mineral pétreo para producir biofertilizantes, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico e Ingeniera Mecánica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Jonathan Vladimir Méndez Andrade

CI: 172458588-8

Quito, agosto de 2018



Andrea Elizabeth Orellana Chiriboga

CI: 171821392-7

Quito, agosto de 2018

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Rene Patricio Quitiaquez Sarsoza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto de Titulación: Diseño y construcción de un molino de martillos triturador de 15 qq/h de mineral pétreo para producir biofertilizantes, realizado por Jonathan Vladimir Méndez Andrade y Andrea Elizabeth Orellana Chiriboga, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como Trabajo Final de Titulación.

Quito, agosto de 2018



Rene Patricio Quitiaquez Sarsoza

CI. 1710597269

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios por darme fortaleza, salud y sabiduría para vencer cada uno de los obstáculos y dificultades presentadas en el trascurso de mis estudios y poder culminar una de mis metas.

Agradezco de manera especial a mis padres Luis y Victoria, por darme todo el apoyo, paciencia, confianza y amor incondicional. Quienes han estado a mi lado aconsejándome y guiándome. A mi hermana Jenny por su apoyo. A Cindy y Keith quienes me apoyaron de una forma desinteresada.

*Jonathan Vladimir Méndez Andrade.*

Dedico este trabajo a Dios por darme la sabiduría, inteligencia y constancia para cumplir cada una de mis metas, a mis padres Silvio, Mercedes, mi hermana Silvia y sobrina Mía por enseñarme a ser respetuosa, responsable y a mi abuelita Mamá Bachita quien me ha dado todo el amor del mundo lo que me ha motivado a seguir adelante cada día.

*Andrea Elizabeth Orellana Chiriboga.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, a cada uno de los docentes quienes no solo nos han formado académicamente sino también a desempeñarnos laboralmente logando ser grandes profesionales.

Un agradecimiento especial a nuestro Director de Tesis Ing. Patricio Quitiaquez quien con su guía ha permitido que podamos culminar la carrera universitaria.

Y también a la empresa ITAL BIO por brindarnos su apoyo y auspicio para la construcción de la máquina.

Jonathan Vladimir Méndez

Andrea Elizabeth Orellana Chiriboga

## ÍNDICE

RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	2
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
GLOSARIO .....	3
NOMENCLATURA .....	4
CAPÍTULO I.....	6
1.  GENERALIDADES .....	6
1.1  Minerales pétreos .....	6
1.1.1  Sulfato de calcio.....	6
1.1.2  Carbonato de calcio.....	7
1.1.3  Mármol.....	8
1.2  Usos de los minerales pétreos .....	9
1.3  Molino .....	9
1.4  Clasificación de molinos .....	9
1.4.1  Molino de bolas .....	9
1.4.1.1  Características [28].....	10
1.4.1.2  Funcionamiento [28] .....	10
1.4.1.3  Utilización .....	11

1.4.2	Molino de barras .....	12
1.4.2.1	Características [34] .....	12
1.4.2.2	Funcionamiento .....	12
1.4.2.3	Utilización .....	13
1.4.3	Molino de martillos.....	13
1.4.3.1	Características [37] .....	13
1.4.3.2	Funcionamiento [37] .....	14
1.4.3.3	Utilización .....	15
1.5	Análisis de alternativas.....	15
1.6	Selección de la alternativa más conveniente .....	17
1.7	Solución para la trituración de minerales pétreos mediante molino de martillos .....	18
1.8	Parámetros de diseño para un molino de martillos.....	18
1.8.1	Capacidad de trituración .....	19
1.8.2	Factor de seguridad .....	19
1.8.3	Esfuerzo a la ruptura de la piedra.....	19
1.8.4	Diseño de martillos .....	20
1.8.4.1	Velocidad tangencial .....	20
1.8.5	Falla por cizalladura [44] .....	23
1.8.6	Falla por tracción.....	25
1.8.7	Momentum inercial .....	25
1.8.8	Fuerza de corte .....	26

1.8.9	Cálculo del eje secundario .....	26
1.8.10	Cálculo del eje motriz .....	27
1.8.11	Teoría de fallas .....	27
1.8.11.1	Falla por esfuerzo normal máximo.....	28
1.8.11.2	Teoría de la energía de distorsión (Von Mises).....	28
1.8.11.3	Factores de resistencia a la fatiga [48] .....	29
1.8.11.3.1	Factor de superficie $k_a$ .....	29
1.8.11.3.2	Factor de tamaño $k_b$ [49] .....	30
1.8.11.3.3	Factor de carga $k_c$ .....	30
1.8.11.3.4	Factor de temperatura $k_d$ [49].....	31
1.8.11.3.5	Factor de confiabilidad $k_e$ .....	31
1.8.12	Escogimiento del motor .....	32
1.8.13	Selección de bandas .....	33
1.8.13.1	Longitud de la correa.....	33
1.8.13.2	Contacto angular.....	34
1.8.13.3	Número de bandas .....	34
1.8.14	Selección de criba .....	34
1.8.15	Diseño de tolva.....	35
1.8.16	Proceso de soldadura.....	35
1.8.16.1	Esfuerzo de soldadura .....	36
1.8.16.2	Carga de flexión .....	36
1.8.17	Análisis de pernos .....	36



1.8.17.1	Cálculo de la resistencia a cortante .....	36
1.8.17.2	Clases de pernos.....	37
1.8.17.3	Coeficiente parcial de seguridad [56] .....	37
1.8.17.4	Esfuerzo cortante.....	37
1.9	Tipo de materiales .....	38
CAPÍTULO II .....		39
2.	CÁLCULO Y DISEÑO DEL MOLINO DE MARTILLOS .....	39
2.1	Esfuerzo último de la piedra.....	39
2.1.1	Probetas sulfato de calcio .....	39
2.1.2	Probetas mármol .....	41
2.2	Energía necesaria para romper la piedra de mármol .....	46
2.3	Capacidad de molienda .....	46
2.4	Cálculo de martillos.....	47
2.5	Diseño del disco porta martillos .....	54
2.6	Cálculo del eje secundario.....	54
2.6.1	Diseño estático del eje secundario .....	54
2.7	Cálculo del eje motriz.....	57
2.8	Escogimiento del motor.....	59
2.9	Selección de bandas.....	60
2.10	Diseño de la tolva .....	62
2.11	Volante de inercia .....	62
2.12	Uniones soldadas .....	63

2.12.1	Esfuerzo de soldadura .....	64
2.12.2	Carga de flexión.....	64
2.13	Cálculo de pernos.....	65
CAPÍTULO III.....		67
3.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	67
3.1	Cuantificación de costos del equipo.....	67
3.2	Costo de elementos normalizados.....	68
3.3	Tiempo de utilización de maquinarias .....	70
3.4	Costo de maquinado.....	70
3.5	Costo indirecto .....	71
3.5.1	Costo diseño.....	71
3.5.2	Gastos provisionales .....	71
3.6	Costo total de la máquina .....	71
3.7	Retorno de la inversión.....	71
3.7.1	Fondo neto efectivo (FNE) .....	72
3.7.2	Valor actual neto (VAN).....	72
3.7.3	Tasa interna de rendimiento (TIR).....	73
3.7.4	PAY-BACK actualizado.....	74
CONCLUSIONES .....		75
RECOMENDACIONES .....		76
BIBLIOGRAFÍA .....		77
ANEXOS .....		84

TIEMPO DE UTILIZACIÓN DE MAQUINARIAS .....	85
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	86
Instrucciones de Seguridad .....	86
Operación de la Máquina .....	87
Mantenimiento de la Máquina .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Piedras de sulfato de calcio [4].....	6
<b>Figura 2.</b> Piedras de carbonato de calcio [8].....	7
<b>Figura 3.</b> Representación del mármol [11].....	8
<b>Figura 4.</b> Esquema de las partes de un molino de bolas [17].....	10
<b>Figura 5.</b> Vista frontal funcionamiento molino de bolas [19].....	11
<b>Figura 6.</b> Partes y vista interna de un molino de barras [24]. ....	12
<b>Figura 7.</b> Funcionamiento de un molino de barras [25].....	13
<b>Figura 8.</b> Molino de martillos [27].....	14
<b>Figura 9.</b> Ensayo para obtención del esfuerzo a la ruptura del material. ....	19
<b>Figura 10.</b> Resultado del análisis del material. ....	20
<b>Figura 11.</b> Gráfica para selección tipo de bandas [41].....	33
<b>Figura 12.</b> Proceso de soldadura [43].....	35
<b>Figura 13.</b> Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #1.....	40
<b>Figura 14.</b> Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #2.....	40
<b>Figura 15.</b> Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #3.....	41
<b>Figura 16.</b> Ensayo a la probeta de mármol #1.....	42
<b>Figura 17.</b> Ensayo a la probeta de mármol #2.....	42
<b>Figura 18.</b> Ensayo a la probeta de mármol #3.....	43
<b>Figura 19.</b> Ensayo a la probeta de mármol #4.....	44
<b>Figura 20.</b> Ensayo a la probeta de mármol #5.....	44
<b>Figura 21.</b> Ensayo a la probeta de mármol #6.....	45
<b>Figura 22.</b> Barra de acero con la que se realiza el ensayo. ....	46
<b>Figura 23.</b> Dimensiones del martillo.....	50

<b>Figura 24.</b> Diagrama de cuerpo libre – eje porta martillos. ....	54
<b>Figura 25.</b> Reacciones en los apoyos. ....	55
<b>Figura 26.</b> Carga puntual.....	55
<b>Figura 27.</b> Momentos flectores y cortantes. ....	56
<b>Figura 28.</b> Eje principal con carga puntual. ....	57
<b>Figura 29.</b> Diagrama de momentos flectores y cortantes.....	58
<b>Figura 30.</b> Selección del tipo de bandas [41].....	61
<b>Figura 31.</b> Volante de inercia.....	63
<b>Figura 32.</b> Valores límites de la garganta de soldadura [46]. ....	63
<b>Figura 33.</b> Resistencia de electrodos [45]. ....	64
<b>Figura 34.</b> Uniones atornilladas características de los pernos [46].....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades físicas y composición del sulfato de calcio [5, 6].....	7
<b>Tabla 2.</b> Propiedades físicas y composición del mármol [13, 14]. ....	9
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas del molino de bolas [20, 21]. ....	11
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas del molino de barras [26].....	13
<b>Tabla 5.</b> Ventajas y desventajas del molino de martillos [28], [29]. ....	15
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de selección. ....	16
<b>Tabla 7.</b> Alternativas. ....	17
<b>Tabla 8.</b> Parámetros en el factor de la condición superficial [38].....	30
<b>Tabla 9.</b> Factor de confiabilidad (Kc) [38].....	31
<b>Tabla 10.</b> Factor de confiabilidad.....	31
<b>Tabla 11.</b> Tipos de tornillos. ....	37
<b>Tabla 12.</b> Tipo de materiales. ....	38
<b>Tabla 13.</b> Resultados esfuerzo a la ruptura de las piedras de mineral pétreo.....	46
<b>Tabla 14.</b> Pesos que soporta el eje principal. ....	57
<b>Tabla 15.</b> Costos directos e indirectos.....	67
<b>Tabla 16.</b> Costos de materia prima. ....	68
<b>Tabla 17.</b> Costo de partes normalizadas.....	69
<b>Tabla 18.</b> Costos de maquinado. ....	70
<b>Tabla 19.</b> Costo total de la máquina. ....	71
<b>Tabla 20.</b> Fondo neto efectivo (FNE). ....	72
<b>Tabla 21.</b> Valor actual neto (VAN).....	73
<b>Tabla 22.</b> Tasa interna de rendimiento (TIR).....	73
<b>Tabla 23.</b> Tiempo de recuperación la inversión. ....	74

## RESUMEN

Este proyecto consiste en el diseño y construcción de un molino de martillos, que tenga una capacidad de triturar 15 qq/h de mineral pétreo para producir biofertilizantes.

Se detalla propiedades físicas y composición del material pétreo como lo es el sulfato de calcio, carbonato de calcio y mármol, con lo cual se determina que el mármol con 3 (Mohs) tiene mayor gado de dureza.

Mediante análisis comparativo de alternativas entre molino de bolas, barras, y martillos, se coteja ciertas condiciones que permiten seleccionar al molino de martillos como la mejor opción para el desarrollo del objetivo planteado.

Se diseña los elementos principales del molino como: martillos, eje principal, eje secundario, selección de motor eléctrico, bandas, tolva, criba, entre otros.

Para el concerniente cálculo de sus componentes mecánicos se considera el esfuerzo a la ruptura de la piedra y un factor de seguridad de 3.

***Palabras claves:*** Molino de martillos, mineral pétreo, biofertilizantes, esfuerzo a la ruptura.

## ABSTRACT

This project consists of the design and construction of a hammer mill, which has a capacity to crush 15 qq / h of stony mineral to produce biofertilizers.

Physical properties and composition of the stony material are detailed as is calcium sulfate, calcium carbonate and marble, with which it is determined that the marble with 3 (Mohs) has greater degree of hardness.

By comparative analysis of alternatives between ball mill, bars and hammers, select the conditions that allow selecting the hammer mill as the most appropriate option for the development of the proposed objective.

The main elements of the mill are designed as: hammers, main shaft, secondary shaft, selection of electric motor, belts, hopper, screen, among others.

For the relative calculation of its mechanical components is considered the effort to break the stone and a safety factor of 3.

**Keywords:** *Hammer mill, stony mineral, biofertilizers, effort to rupture.*



## **INTRODUCCIÓN**

La producción de biofertilizantes es muy beneficiosa para los agricultores, debido a que pueden obtener buenos resultados en las propiedades de los suelos [1].

Es por ello que las empresas existentes a nivel nacional están forzadas a mejorar sus procesos productivos.

La empresa ITAL BIO, se ha visto obligada a renovar su proceso de trituración de mineral pétreo mediante la implementación y uso de un molino, el cual será más versátil y económico, con lo que se trata de optimizar los tiempos de producción que se realizan de forma rudimentaria, aumentar la capacidad productiva y disminuir el esfuerzo físico del personal que actualmente posee la empresa.

La elección del tipo de molino para el desarrollo de este tema parte de tres alternativas planteadas, en las cuales se consideran parámetros como capacidad de la máquina, costo, facilidad de construcción, uso, mantenimiento, entre otras.

Para el diseño apropiado de la máquina de trituración de mineral pétreo, se consideran criterios de ingeniería como selección de materiales, los mismos que permiten su correcta construcción.

## **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un molino de martillos triturador de 15 qq/h de mineral pétreo para producir biofertilizantes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Mejorar la productividad de biofertilizantes mediante la implementación de un molino de martillos.
- Plantear alternativas viables del molino de martillos triturador de minerales y seleccionar la mejor opción.
- Diseñar, y calcular los elementos mecánicos que componen un molino de martillos.
- Seleccionar los materiales adecuados para que resistan el peso de los materiales a ser triturados.
- Analizar los costos generados en el desarrollo del diseño y construcción del molino de martillos.
- Validar el funcionamiento del molino de martillos mediante pruebas.

## GLOSARIO

**Caliza.-** Roca sedimentaria, de textura compacta, formada de carbonato de cal [2].

**Chumaceras.-** Es un rodamiento sobre la que se apoya y gira un eje de máquina [3].

**Criba.-** Malla metálica, empleada generalmente para separar clasificar o seleccionar elementos de diferente granulometría [4].

**Esfuerzo cortante.-** Fuerza interna que desarrolla un cuerpo como respuesta a una fuerza cortante y que es tangencial a la superficie sobre la que actúa. También llamado fuerza de cizallamiento [5].

**Factor de seguridad.-** Es la relación de la resistencia real entre la resistencia requerida [6].

**Lechada.-** Masa muy clara de cal, yeso o cemento mezclados con agua, a la que ha se le añade también arena o tierra [7].

**Metaloide.-** Elemento químico que no puede clasificarse dentro de metales y no metales, porque posee características de ambos [8].

**Molienda.-** Reducción en el tamaño del material mineralizado en partículas más pequeñas [9].

**Molturabilidad.-** Factor usado para determinar la cantidad de pulverización del material en un molino [10].

**Trituración.-** Reducción de las dimensiones de las partículas del material a moler [11].

## NOMENCLATURA

**a:** Aceleración.

**Ad:** Área de desgarre.

**Ast:** Área de sección transversal del martillo.

**C:** Es la longitud desde el extremo al eje neutro.

**d1:** Distancia desde el inicio del martillo hasta el punto más extremo.

**e:** Espesor del martillo.

**Ec:** Energía Cinética.

**F:** Fuerza que actúa en cada martillo.

**Fcf:** Fuerza centrífuga.

**ff:** Factor de fricción.

**Fs:** Factor de servicio.

**L:** Largo del martillo.

**M:** Momento flexionante.

**mm:** Masa del martillo.

**mo:** Masa del objeto de prueba.

**mp:** Masa de la piedra.

**P:** Potencia del molino.

**Pd:** Potencia de diseño.

**Pm:** Potencia del motor.

**rg:** Radio de giro.

**Sy:** Esfuerzo cortante admisible para el material.

**T:** Torque.

**Vc:** Velocidad del molino con carga.

**Vm2:** Velocidad del martillo.

**Vt:** Velocidad tangencial.

**Vv:** Velocidad tangencial del molino sin carga.

**Wc:** Velocidad angular con carga.

$\theta$  : Espacio angular recorrido para los martillos.

$\omega$  : Velocidad angular del motor.

**#gt:** Número de golpes para triturar el material.

$\alpha$  : Aceleración angular.

$a$  : Ancho del martillo.

$d$  : Distancia del Martillo.

$\tau$  : Esfuerzo cortante.

$\eta$  : Factor de seguridad.

$F_c$  : Fuerza de Corte.

$I_0$  : Momento de Inercia.

$Pe$  : Peso específico del material.

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

En este capítulo se puntualiza toda la teoría que sustenta el desarrollo de investigación de este tema. Se trata las principales definiciones relacionadas con el mineral pétreo a triturar, extracción, propiedades, y composición.

Se describe las características de tres tipos de molinos lo que permite escoger la mejor alternativa para ser utilizado en este proyecto, finalizando con la formulación a ser utilizada para diseñar cada una de las partes de la máquina seleccionada.

### 1.1 Minerales pétreos

Son elementos provenientes de la roca y se utilizan sin que antes hayan sufrido transformaciones, regularmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños. Estos pueden ser naturales extraídos directamente de la naturaleza o artificiales procesados e industrializados por el hombre [12].

#### 1.1.1 Sulfato de calcio

Conocido también como yeso, es un mineral muy abundante en la naturaleza. En estado natural se presenta como roca de color blanquecino, como se muestra en la Figura 1, su formulación química es  $\text{CaSO}_4$  [13].



**Figura 1.** Piedras de sulfato de calcio [14].

El sulfato de calcio es extraído de las minas, el tamaño de las piedras puede ser de hasta 50 cm de diámetro [14].

En la Tabla 1, se muestra las propiedades físicas y composición del Sulfato de Calcio.

**Tabla 1.** Propiedades físicas y composición del sulfato de calcio [15, 16].

<b>Propiedades Físicas y Composición del Material</b>	
Densidad.	1100-1200 kg/m <sup>3</sup> .
Dureza en (M).	1.5 a 2.
Solubilidad en agua.	(20° g/100g).
Viscosidad a (25°C).	No se posee.
Azufre (S).	21%
Calcio (Ca).	23%

### 1.1.2 Carbonato de calcio

El carbonato de calcio es un componente abundante en la naturaleza. Se presenta de varias formas y grados de pureza, especialmente como roca, como se muestra en la Figura 2. Su formulación química es  $\text{CaCO}_3$  [17].

Es extraído de las minas, en forma natural pasan por procesos de extracción, trituración y molienda.



**Figura 2.** Piedras de carbonato de calcio [18].

Las propiedades químicas del material son detalladas a continuación [19, 20].

- La dureza en Mohs es de 2 a 3.
- Insoluble en el agua.
- Contiene como máximo 40% de Cal.

### 1.1.3 Mármol

Es una piedra metamórfica, compacta formada a partir de rocas calizas de gran calidad y belleza. Como se muestra en la Figura 3, el mármol se presenta en forma de piedra o bloques compactos [21].



**Figura 3.** Representación del mármol [21].

Este mineral se extrae de canteras a cielo abierto, cuevas o minas, que se encuentran al ras de la tierra o a grandes profundidades, lo que hace que su costo sea elevado.

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza un extracto de mármol (lechada), debido a que su costo de adquisición es más económico [22].

En la Tabla 2, se muestra las propiedades físicas y composición del mármol.



**Tabla 2.** Propiedades físicas y composición del mármol [23, 24].

<b>Propiedades Físicas y Composición del Material</b>	
Densidad.	2380 y 2870 kg/m <sup>3</sup> .
Dureza (M).	3
Dureza (R)	Inferior a 10
Solubilidad en H <sub>2</sub> O.	0.2 y 0.7 %
Viscosidad.	600 y 1000 kg/cm <sup>2</sup> .
Carbonato de Calcio	90%.
Elementos impuros.	10%.

## **1.2 Usos de los minerales pétreos**

Los minerales pétreos procesados son utilizados como biofertilizantes, lo que permite aumentar el nivel de producción de cosechas, mejorar el cultivo de hongos, crianzas de aves, reducir la concentración de aluminio en el suelo y elevar el crecimiento de las plantas [25].

## **1.3 Molino**

Es una máquina para moler, compuesta de mecanismos necesarios para transmitir y regularizar el movimiento producido por una fuerza motriz [26].

## **1.4 Clasificación de molinos**

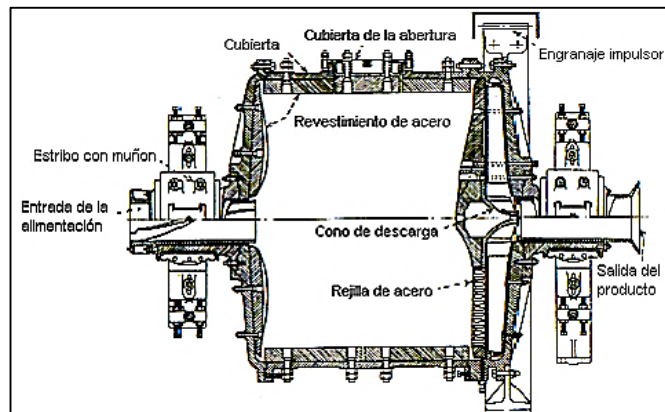
Los molinos de bolas, barra y martillos son utilizados en la agroindustria para triturar diferentes minerales pétreos. Cada uno de estos varía dependiendo de sus características técnicas.

### **1.4.1 Molino de bolas**

El equipo de esferas (bolas) gira sobre un eje horizontal y en su interior contiene bolas generalmente de acero (forjado, fundido o hierro colado). La disminución del tamaño

se realiza mediante el impacto de la caída de la herramienta sobre la materia. La alimentación y descarga del material se realiza a través de muñones huecos en los extremos del molino, como se observa en la Figura 4.

Su operatividad es fácil y sus aplicaciones son varias [27].



**Figura 4.** Esquema de las partes de un molino de bolas [27].

#### **1.4.1.1 Características [28]**

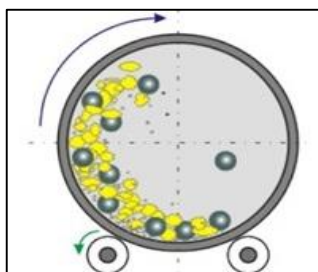
- Función estable y buena calidad a prueba de fricción.
- Productos con granularidad uniforme.
- Poca inversión y mucho ahorro energético.
- Fácil operación y uso con seguridad.

#### **1.4.1.2 Funcionamiento [28]**

Este tipo de molino funciona por el giro del cilindro con bolas de acero. La rotación suele ser de 4 a 20 revoluciones por minuto, lo más lento será la rotación [28].

El molino de bolas se utilizan generalmente para triturar material de 1/4 de pulgada incluso más fino, Para realizar este efecto, la máquina debe funcionar en un sistema cerrado [28].

Como se muestra en la Figura 5, el armazón tubular gira sobre su propio eje, donde se encuentran las bolas entre 35% a 45% de nivel de llenado y generalmente opera en circuito cerrado con un clasificador [29].



**Figura 5.** Vista frontal funcionamiento molino de bolas [29].

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas del molino de bolas [30, 31].

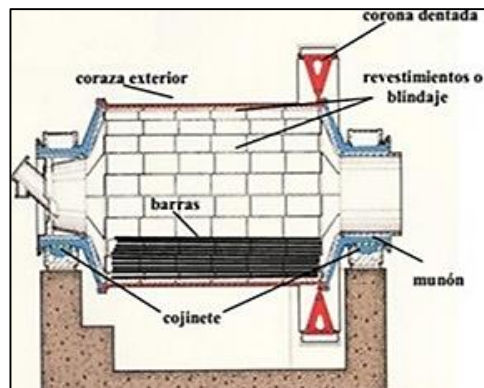
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo de instalación y de molienda es bajo.</li> <li>• Es aplicable para materiales de todos los grados de dureza.</li> <li>• Permite pulverizar materiales más finos que otros tipos de molinos.</li> <li>• Se usa para triturar diversas clases de materiales.</li> <li>• Fácil operación y uso con seguridad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del consumo de energía.</li> <li>• Velocidad de funcionamiento baja.</li> <li>• Falta de control en la calidad del producto.</li> <li>• Costo de construcción y producción alto.</li> </ul>

#### **1.4.1.3 Utilización**

El molino de bolas es un equipo utilizado en los campos de la industria minera, construcción, abono, cerámica, vidrio, entre otros. Tiene dos procesos para molienda: el seco y el húmedo. El trabajo mediante esta máquina supone un ahorro energético [32].

### 1.4.2 Molino de barras

Este tipo de molino utiliza las barras para la trituración, las cuales muelen el material a través del giro en el interior del mecanismo. Son cilindros horizontales largos con rotación axial, que contienen barras de acero de longitud igual a la del molino, como se muestra en la Figura 6. Dan una fracción de partículas finas muy bajas [33], se caracterizan por una razón largo y diámetro del cilindro mayor de 1.5:1 [34].



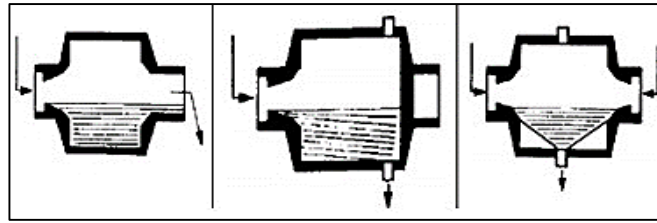
**Figura 6.** Partes y vista interna de un molino de barras [34].

#### 1.4.2.1 Características [34]

- Operación fácil y segura.
- Funcionamiento estable.
- El tamaño del producto regular.
- Bajo consumo de energía.
- Baja inversión, alta rentabilidad.

#### 1.4.2.2 Funcionamiento

El material se va moliendo por la acción del movimiento de las barras que se encuentran libres, el mineral molido continúa el proceso, pasando en línea al molino de bolas [35]. Ver Figura 7.



**Figura 7.** Funcionamiento de un molino de barras [35].

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas del molino de barras [36]

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producen poco polvo.</li> <li>• Muele muy fino y sirve para material duro.</li> <li>• Es de fácil manipulación y mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El tamaño de partículas no es homogéneo</li> <li>• Produce contaminación del producto final.</li> <li>• Costo de construcción y producción elevado.</li> </ul>

#### **1.4.2.3 Utilización**

El molino de barras se utiliza en las minas de metal, industrias del vidrio, materiales de construcción, y molienda de diversos minerales, rocas y arena artificial [37].

#### **1.4.3 Molino de martillos**

Este equipo es una máquina diseñada para procesos como trituración y molienda, tienen la capacidad de procesar varios tipos de materiales con distintas granulometrías [37].

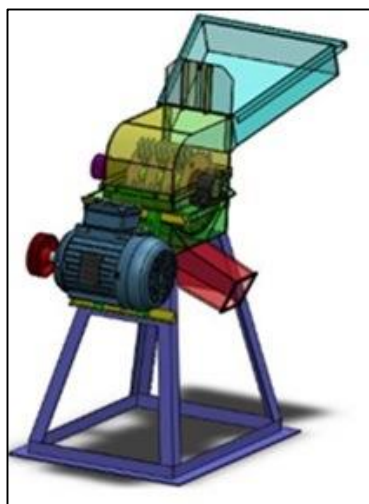
##### **1.4.3.1 Características [37]**

- Alta capacidad de producción y bajo costo de inversión.
- Alta proporción de trituración.

- Bajo consumo de energía.
- El tamaño de partícula uniforme.
- Estructura simple, fácil de operar y poseen gran robustez.
- Sistema de martillos fijos u oscilatorios.
- Facilidad al cambiar sus piezas y por consiguiente posibles de limpiar.
- Ocupan poco espacio y tienen una gran capacidad de molienda.
- Cuentan con una boca de alimentación grande y un diseño moderno y seguro con deflector para evitar que el producto regrese.
- Tolva de descarga con salida directa del producto.

#### 1.4.3.2 Funcionamiento [37]

Como se muestra en la Figura 8, por la tolva ingresa el producto y por gravedad cae al interior de la cámara de trituración, el eje gira y la fuerza centrífuga permite que los martillos se coloquen perpendicularmente, los cuales golpean el material. Esto ocurre sucesivamente hasta llegar a obtener la granulometría deseada mediante el paso del material por la criba [37].



**Figura 8.** Molino de martillos [37].

**Tabla 5.** Ventajas y desventajas del molino de martillos [38], [39].

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alta capacidad de producción.</li><li>• Fácil mantenimiento y operación.</li><li>• Bajo consumo de energía.</li><li>• Bajo costo de producción.</li><li>• Estructura simple y no son muy ruidosos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La calidad de molienda no es buena si los granos presentan humedad.</li><li>• La molienda no es tan fina en comparación con otros equipos.</li><li>• Produce altas temperaturas en la cámara de molienda.</li><li>• La molienda no es uniforme.</li></ul>

#### **1.4.3.3 Utilización**

El molino de martillos es utilizado para generar polvo de granulometría gruesa y fina.

El tamaño de salida puede llegar a más del 90% de 0 a 3 mm.

Se utiliza en procesos de metalurgia, minería, industria cementera, entre otros.

Especialmente, se usa en las plantas para elaboración de fertilizantes orgánicos [40].

#### **1.5 Análisis de alternativas**

El análisis está basado en seleccionar la alternativa más eficiente para triturar 15 qq/h de mineral pétreo y cumplir con los objetivos planteados basado en la evaluación de parámetros como los detallados a continuación en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros de selección.

<b>Parámetros</b>	<b>Calificación</b>
Capacidad de la máquina.	1 Baja. 3 Media. 5 Alta.
Costos de Fabricar.	1 Caro. 3 Accesible. 5 Económico.
Costos de Comprar.	1 Caro. 3 Accesible. 5 Económico.
Costos de Alquilar.	1 Caro. 3 Accesible. 5 Económico.
Seguridad de Uso.	1 Riesgo. 3 Poco riesgoso. 5 Seguro.
Factibilidad de materiales.	1 No disponible. 3 Bajo pedido. 5 Disponible.
Grado de fabricación.	1 Complejo. 3 Complejidad media. 5 Fácil.
Facilidad de Operación.	1 Complejo. 3 Complejidad media. 5 Fácil.
Mantenimiento.	1 Caro. 3 Accesible. 5 Económico.
Vida Útil.	1 Entre 1 a 3 años. 3 Entre 4 a 7 años. 5 Entre 8 a 10 años.



### 1.6 Selección de la alternativa más conveniente

En la Tabla 7, mediante sumatoria se detalla la mejor alternativa a seleccionar.

**Tabla 7.** Alternativas.

	ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3
Parámetros a Evaluar	Equipo de Bolas	Equipo de Barras	Equipo de Martillos
Capacidad de la máquina.	5	5	3
Costos de Fabricar.	3	1	5
Costos de Comprar.	1	1	1
Costos de Alquilar.	1	1	1
Seguridad de Uso.	5	5	5
Factibilidad de materiales.	3	3	5
Grado de fabricación.	3	3	5
Facilidad de Operación.	5	5	5
Mantenimiento.	3	3	5
Vida Útil.	5	5	5
<b>Total</b>	<b>34</b>	<b>32</b>	<b>40</b>

Después de la comparación de alternativas realizada, se selecciona al molino de martillos, para triturar mineral pétreo, esto debido a que obtiene una mayor calificación en cada uno de los parámetros evaluados.

### **1.7 Solución para la trituración de minerales pétreos mediante molino de martillos**

Mediante los parámetros de evaluación se determina el empleo del molino de martillos para triturar mineral pétreo debido a que es capaz de procesar diversos tipos de materiales y poseen un mayor tiempo de vida útil [41].

Se coloca en la tolva las piedras para que pueda ingresar al molino, el cual es golpeado por un conjunto de martillos girando a una determinada velocidad. Este proceso se repite mientras el material se encuentra en el interior del molino, se suele colocar a la máquina una criba, la que determina el tamaño máximo de las partículas (material) después de haber sido triturado [42].

### **1.8 Parámetros de diseño para un molino de martillos**

Después de haber seleccionado como alternativa al molino de martillos, se procede a detallar los parámetros empleados para el diseño de la máquina:

- Martillos.
- Disco porta martillos.
- Eje porta martillos.
- Eje principal.
- Selección del motor.
- Selección de bandas.
- Selección de criba.
- Diseño de tolva.

### 1.8.1 Capacidad de trituración

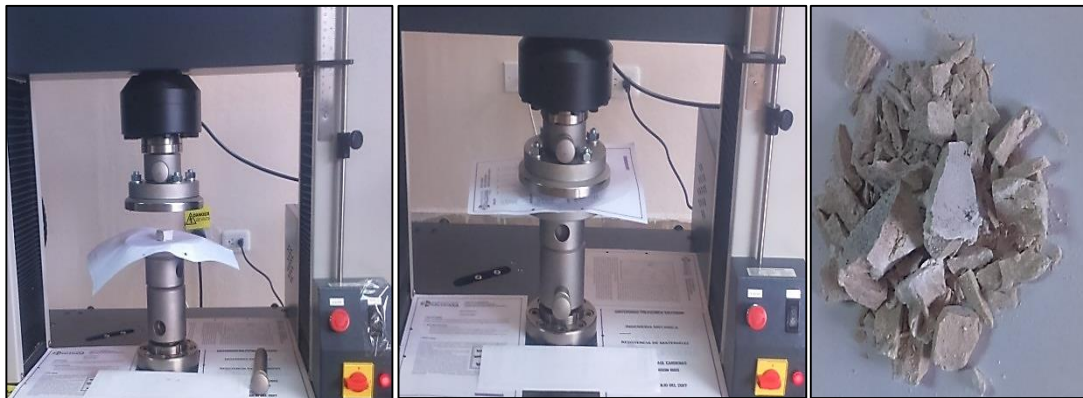
Se toma en cuenta la capacidad de producción establecida de la máquina es decir de 15 qq/h.

### 1.8.2 Factor de seguridad

Al ser el molino de martillos una máquina conformada por estructuras estáticas y de distintas clases de materiales, se ha optado para su diseño trabajar con el factor 3 como mínimo para seguridad.

### 1.8.3 Esfuerzo a la ruptura de la piedra

El esfuerzo a la ruptura se determina mediante análisis de materiales. Se coloca cada una de las distintas probetas sobre una base metálica y la prensa con una carga produce la ruptura de la piedra como se observa en la Figura 9. El resultado de análisis consta en la Figura 10.



**Figura 9.** Ensayo para obtención del esfuerzo a la ruptura del material.

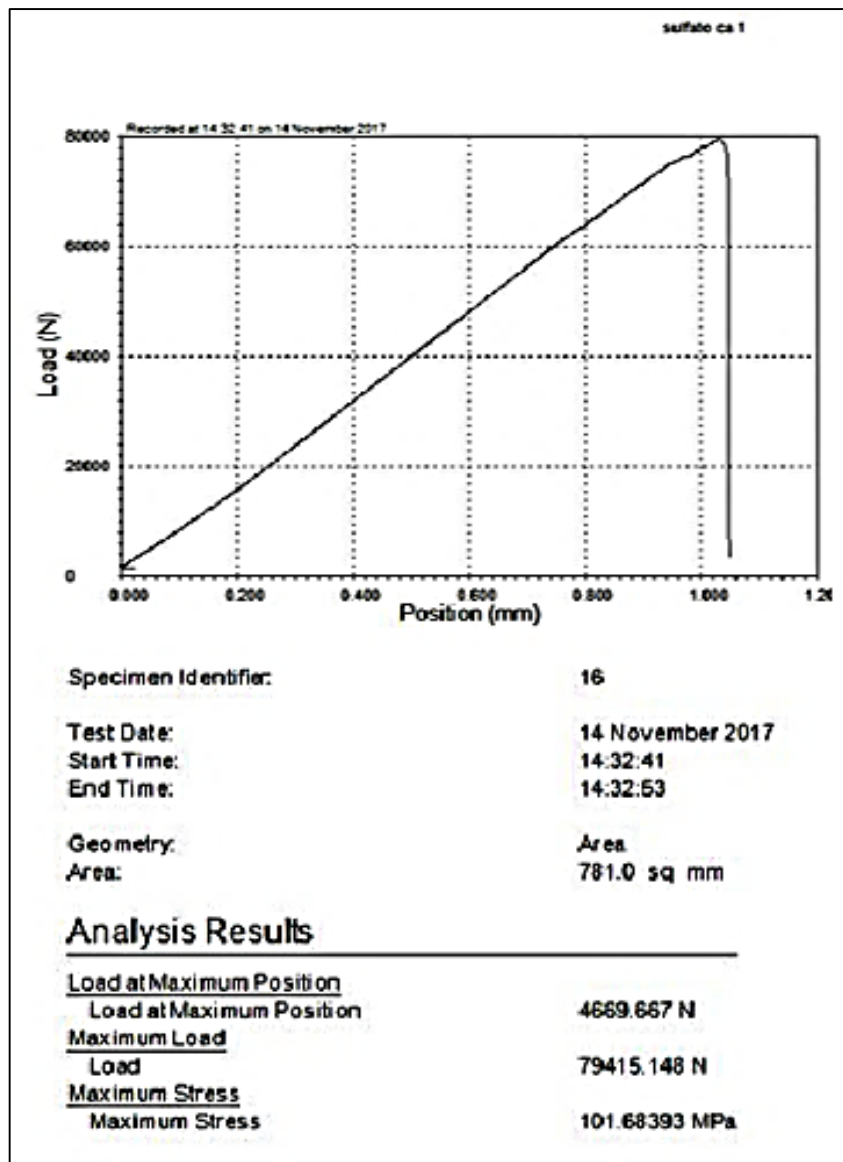


Figura 10. Resultado del análisis del material.

## 1.8.4 Diseño de martillos

### 1.8.4.1 Velocidad tangencial

La rotación de martillos genera movimiento rotacional, por lo tanto la energía cinética se expresa mediante la ecuación 1 [43].

$$Ec = \frac{1}{2} m_p \cdot Vm^2 \quad (1)$$

**Donde:**

Ec: Energía Cinética.

m<sub>p</sub>: Masa de la piedra.

V<sub>m</sub><sup>2</sup>: Velocidad del martillo.

Para obtener la velocidad tangencial del martillo se determina mediante la ecuación 2.

$$V_t = \sqrt{\frac{m_o \cdot g \cdot h}{m_p}} \left( \frac{m}{s} \right) \quad (2)$$

**Donde:**

V<sub>t</sub>: Velocidad tangencial.

m<sub>o</sub>: Masa del objeto de prueba.

m<sub>p</sub>: Masa de la piedra.

La velocidad tangencial final es determinada mediante la ecuación 3, donde la velocidad del martillo se puede considerar como V<sub>v</sub> [31]

$$V_c = -V_v \cdot \frac{C_s - 2}{C_s + 2} \left( \frac{m}{s} \right) \quad (3)$$

**Donde:**

V<sub>c</sub>: Velocidad del molino con carga.

V<sub>v</sub>: Velocidad tangencial del molino sin carga.

C<sub>s</sub>: Coeficiente de fluctuación.

El radio de giro se determina mediante la ecuación 4 [44].

$$r_g = \frac{V_c \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \text{ (m)} \quad (4)$$

**Donde:**

$r_g$ : Radio de giro.

$\omega$ : Velocidad angular del motor

La velocidad angular con carga se determina mediante la ecuación 5 [31].

$$W_c = \frac{V_c}{r_g} \left( \frac{rad}{s} \right) \quad (5)$$

**Donde:**

$W_c$ : Velocidad angular con carga.

La aceleración angular se determina mediante la ecuación 6 [44].

$$\alpha = \frac{W_v^2 - W_c^2}{2 \cdot \theta} \left( \frac{rad}{s^2} \right) \quad (6)$$

**Donde:**

$\alpha$  : Aceleración angular [44].

$\theta$  : Espacio angular recorrido [44].

La cantidad de martillos se determina mediante la ecuación 7 [38].

$$\#Martillos = \left( \frac{granos}{rev} \cdot \#gt \right) \cdot n \quad (7)$$

**Donde:**

$\#gt$ : Número de golpes para triturar el material.

$\eta$ : Factor de seguridad.

Para definir el diseño se considera su simetría rectangular, logrando con ello optimizar su funcionamiento.

En el diseño se utiliza la masa que debe tener cada uno de ellos y se determina con la ecuación 8 [45].

$$m_m = a \cdot Pe \cdot e \cdot L \text{ (kg)} \quad (8)$$

**Donde:**

$m_m$ : Masa del martillo.

$a$ : Ancho del martillo.

$Pe$ : Peso específico del material.

$e$ : Espesor del martillo.

$L$ : Largo del martillo.

A partir de la Segunda Ley de Newton, se obtienen fuerzas que actúa en cada uno de los martillos. Se expresa con la ecuación número 9 [46].

$$\sum F = m_m \cdot a \quad \text{A)} \quad (9)$$

$$\sum F = 0 \quad \text{B)}$$

**Donde:**

$F$ : Fuerza que actúa en cada martillo.

$a$ : Aceleración.

### 1.8.5 Falla por cizalladura [44]

La falla por cizalladura se presenta generalmente cuando una fuerza es aplicada en el área de unión del martillo con el perno del eje. Se determina mediante las siguientes ecuaciones [44].

Sección crítica en posible desgarre, se determina mediante la ecuación 10 [44].

$$A_d = e \cdot d_1 \cdot 2 \text{ (m)} \quad (10)$$

**Donde:**

$A_d$ : Área de desgarre.

$d_1$ : Distancia desde el inicio del martillo hasta el punto más extremo.

Fuerza centrífuga, determinada en ecuación 11 [44].

$$F_{cf} = \omega^2 \cdot m_m \cdot r_g \text{ (N)} \quad (11)$$

**Donde:**

$F_{cf}$ : Fuerza centrífuga.

$\omega$ : Velocidad angular del martillo.

$\omega = W_v^2$ .

Se procede a determinar el esfuerzo cortante, mediante la ecuación 12 [47]

$$\tau = \frac{F_{cf}}{A_d} \quad (12)$$

**Donde:**

$\tau$ : Esfuerzo cortante.

El fs se obtiene a partir de la formulación número 13 [44].

$$\eta = \frac{S_y}{2 \cdot \tau} \quad (13)$$

**Donde:**

$\eta$ : Factor de seguridad.

$S_y$ : Esfuerzo cortante admisible para el material.



### 1.8.6 Falla por tracción

Se obtiene el área de la sección transversal y esfuerzo normal mediante la ecuación 14 y 15 [47].

$$A_{st} = a \cdot e \text{ (m}^2\text{)} \quad (14)$$

**Donde:**

$A_{st}$ : Área de sección transversal del martillo.

$$\sigma = \frac{F_{cf}}{A_{st}} \text{ (MPa)} \quad (15)$$

Se determina el factor de seguridad para esfuerzo normal mediante la ecuación 16 [48].

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (16)$$

**Donde:**

$\eta$ : Factor de seguridad.

### 1.8.7 Momentum inercial

Se considera la masa y la distancia del martillo, y se representa mediante la ecuación 17 [44].

$$I_0 = \frac{1}{12} m_m \cdot d^2 \text{ (MPa)} \quad (17)$$

**Donde:**

$I_0$ : Momento de Inercia.

$d$ : Distancia del Martillo.

### 1.8.8 Fuerza de corte

La fuerza de corte se obtiene mediante la ecuación 18, donde se considera la inercia, la aceleración angular y distancia del martillo [44].

$$F_c = \frac{I_0 \cdot \alpha}{d} \text{ (N)} \quad (18)$$

**Donde:**

$F_c$ : Fuerza de Corte.

### 1.8.9 Cálculo del eje secundario

Se considera el diámetro de cada uno de los martillos. Se definen las reacciones que aplican al eje, esfuerzo normal cortante y factor de seguridad.

El esfuerzo normal cortante es determinado mediante la ecuación 19 [43].

$$\sigma = \frac{M \cdot C}{I} \text{ (Mpa)} \quad (19)$$

**Donde:**

M: Momento flexionante [43].

C: Distancia desde el eje neutro al extremo [43].

I: Inercia del eje [43].

El factor de seguridad para este elemento se determina mediante la ecuación 20 [48].

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (20)$$

### 1.8.10 Cálculo del eje motriz

El momento flector se determina mediante la ecuación 21 [45].

$$Mf = \sqrt{Mf_{xy}^2 + Mf_{xz}^2} \text{ (Nmm)} \quad \text{A)}$$
$$Mfe = \sqrt{Mf^2 + 0,75Mt^2} \text{ (Nmm)} \quad \text{B)} \quad (21)$$

**Donde:**

Mfe: Momento flector en la sección analizada del árbol [45].

Mf: Momento flector en la sección analizada del árbol [45].

Mt: Momento torsor en la sección analizada del árbol [45].

El cálculo del diámetro mínimo requerido del eje principal esta determinado por la ecuación 22 [45].

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot Mfe}{\pi \cdot \left[1 - \left(\frac{d_0}{d}\right)^4\right] \cdot [\sigma - 1f]}} \quad (22)$$

**Donde:**

$\sigma - 1f$  : Esfuerzo admisible por fatiga [45].

### 1.8.11 Teoría de fallas

Se refiere a la pérdida de su operatividad, es decir cuando una máquina deja de ser útil [48].

Esta falta de funcionalidad se da por rotura, degradación, distorsión permanente [48].

### 1.8.11.1 Falla por esfuerzo normal máximo

Ocurre en los esfuerzos normales principales cuando aumenta el esfuerzo normal que da lugar a la falla en el análisis uniaxial [48].

Si:  $S_1$  = Esfuerzo Principal 1 [48]  $\sigma_{yc}$  = Esfuerzo de fluencia a compresión [48]

$S_2$  = Esfuerzo Principal 2 [48]  $\sigma_{yt}$  = Esfuerzo de fluencia a tensión [48].

$S_3$  = Esfuerzo Principal 3 [48]

Se cumple los siguientes parámetros [48]:

$$\begin{aligned}\sigma_{yc} &\geq S_1 \leq \sigma_{yt} \\ \sigma_{yc} &\geq S_2 \leq \sigma_{yt} \\ \sigma_{yc} &\geq S_3 \leq \sigma_{yt}\end{aligned}\tag{23}$$

Aplicando un factor de diseño se tiene las ecuaciones detalladas a continuación [48]:

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{yc}}{n_d} &\geq S_1 \leq \frac{\sigma_{yt}}{n_d} \\ \frac{\sigma_{yc}}{n_d} &\geq S_2 \leq \frac{\sigma_{yt}}{n_d} \\ \frac{\sigma_{yc}}{n_d} &\geq S_3 \leq \frac{\sigma_{yt}}{n_d}\end{aligned}\tag{24}$$

En los materiales frágiles los siguientes factores son considerados para el esfuerzo de fluencia  $\sigma_{yc}$  o  $\sigma_{yt}$  [48].

### 1.8.11.2 Teoría de la energía de distorsión (Von Mises)

Esta teoría se obtiene mediante la ecuación 25, donde el esfuerzo plano  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  sean diferentes a cero [48].

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}\tag{25}$$

### 1.8.11.3 Factores de resistencia a la fatiga [48]

Como describe la ecuación 26, estos factores miden ciertos parámetros de resistencia a la fatiga [48].

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (26)$$

**Donde:**

$k_a$ : factor de modificación por la condición superficial.

$k_b$ : factor de modificación por el tamaño.

$k_c$ : factor de modificación por la carga.

$k_d$ : factor de modificación por la temperatura.

$k_e$ : factor de confiabilidad.

$k_f$ : factor de modificación por efectos varios.

$S_e'$  : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotativa.

$S_e$  : Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

#### 1.8.11.3.1 Factor de superficie $k_a$

Como se muestra en la ecuación 27, es el coeficiente que considera el efecto del acabado superficial y se encuentran en intervalos de (0,1) [48].

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (27)$$

**Donde:**

$S_{ut}$ : Resistencia mínima a la tensión

$a$  y  $b$ : Se los obtiene mediante la Tabla 8.

**Tabla 8.** Parámetros en el factor de la condición superficial [48].

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{ut}$ Kpsi	$S_{ut}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frio	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	0.995

#### 1.8.11.3.2 Factor de tamaño $k_b$ [49]

La dimensión del material en secciones críticas tienen efecto de que a mayor tamaño de la pieza menor es su resistencia [49].

Para  $d \leq 0.3$  in (8mm):  $C_{\text{tamaño}} = 1$

Para  $0.3 \text{ in} < d \leq 10 \text{ in}$ :  $C_{\text{tamaño}} = 0.869d^{-0.097}$

Para  $8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm}$ :  $C_{\text{tamaño}} = 1.189d^{-0.097}$

Para carga axial  $k_b=1$  [48].

#### 1.8.11.3.3 Factor de carga $k_c$

La teoría de fatiga se basa, en gran medida, en datos experimentales. Como la mayoría de las curvas y datos obtenidos corresponden a la tendencia “media” que siguen los puntos de ensayo, la confiabilidad de estos datos es del 50%.

En función a los ensayos se ha determinado los siguientes factores [49].

Flexión:  $C_{\text{carga}} = 1$

Carga axial:  $C_{\text{carga}} = 0.70$

Torsión pura  $K_c=1$

Los factores de confiabilidad se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Factor de confiabilidad (Kc) [48].

Confiabilidad (%)	50	90	99	99.9	99.99	99.999
Kc	1	0.897	0.814	0.753	0.702	0.659

#### 1.8.11.3.4 Factor de temperatura kd [49]

Las propiedades del material dependen de su temperatura [49].

$$T \leq 450 \text{ }^{\circ}\text{C} (840^{\circ}\text{F}): \quad C_{\text{temp}} = 1$$

$$450 \text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 550 \text{ }^{\circ}\text{C}: \quad C_{\text{temp}} = 1 - 0.0058(T - 450)$$

$$840 \text{ }^{\circ}\text{F} < T \leq 1020 \text{ }^{\circ}\text{F}: \quad C_{\text{temp}} = 1 - 0.0032(T - 840)$$

#### 1.8.11.3.5 Factor de confiabilidad ke

Los valores de los factores de confiabilidad ke, se muestran en la Tabla 10 [48].

**Tabla 10.** Factor de confiabilidad.

Confiabilidad (%)	Variación de transformación $z_a$	Factor de confiabilidad $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

### 1.8.12 Escogimiento del motor

Para el cálculo del torque se utiliza la fuerza de corte del material a ser triturado, según ecuación 28 [45].

$$T = F_c \cdot d_1 \quad (\text{Nm}) \quad (28)$$

**Donde:**

T: Torque.

Para determinar la potencia del molino se utiliza la ecuación 29 [50].

$$P = T \cdot W \quad (\text{HP}) \quad (29)$$

**Donde:**

P: Potencia del molino.

W= Velocidad angular.

La potencia de diseño se determina mediante la ecuación 30 [45].

$$P_d = P_m \cdot F_s \quad (\text{HP}) \quad (30)$$

**Donde:**

P<sub>d</sub>: Potencia de diseño.

P<sub>m</sub>: Potencia del motor.

F<sub>s</sub>: Factor de servicio.

La distancia entre centros máximos y mínimos se determina mediante la ecuación 31 y 32 respectivamente [45].

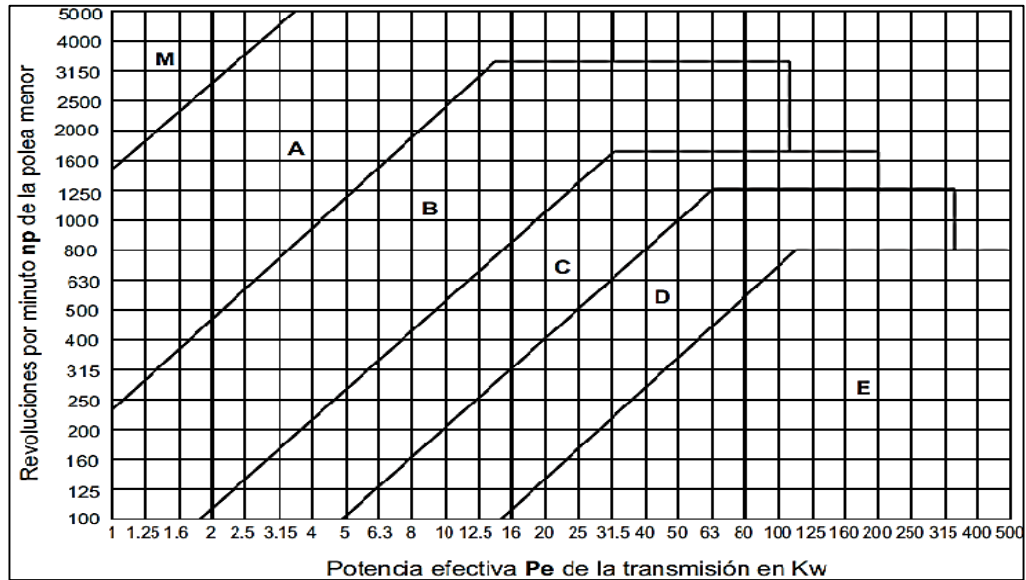
$$C_{m\acute{a}x} = 2 \cdot (D_2 + D_1) \quad (31)$$

$$C_{m\acute{i}n} = 0,7 \cdot (D_2 + D_1) \quad (32)$$



### 1.8.13 Selección de bandas

La banda más adecuada para ser utilizada en esta máquina se determina mediante la Figura 11, en la que se intersecan las rpm de la máquina y la potencia del diseño.



**Figura 11.** Gráfica para selección tipo de bandas [51].

#### 1.8.13.1 Longitud de la correa

Para determinar la longitud primitiva de la banda se utiliza la ecuación 33, [52].

$$L = 2 \cdot C + 1,57(D + d) + \frac{(D + d)^2}{4 \cdot C} \quad (33)$$

**Donde:**

L: Longitud de la correa (mm).

D: Diámetro polea mayor (mm).

d: Diámetro polea menor (mm).

C: Distancia entre centros (mm).

### 1.8.13.2 Contacto angular

El contacto angular se determina mediante la ecuación 34, [39].

$$\alpha = 180 - 57\left(\frac{D-d}{C}\right) \quad (34)$$

**Donde:**

$\alpha$  : Ángulo de contacto.

### 1.8.13.3 Número de bandas

El número de bandas y potencia efectiva se obtienen mediante las ecuaciones 35 y 36 respectivamente [39].

$$N_{bandas} = \frac{Pd}{P_{efectiva}} \quad (35)$$

$$P_{efectiva} = P_{bk} \cdot F_{cl} \cdot F_c \quad (36)$$

**Donde:**

$P_{bk}$  : Potencia corregida de la banda [39].

$F_{cl}$  : Factor de corrección de la longitud de la banda [39].

$F_c$  : Factor de corrección del arco de contacto [39].

### 1.8.14 Selección de criba

La selección de la criba depende de la granulometría del mineral pétreo a procesar, para el caso de este proyecto es de 300 ( $\mu m$ ) micras, el mismo que es definido por el productor.

### 1.8.15 Diseño de tolva

Para el diseño se considera el ángulo de inclinación, según ecuación 37 y se realiza con el valor del factor de fricción entre el mineral pétreo y la tolva [45].

$$\theta = \tan^{-1}(ff) \quad (37)$$

**Donde:**

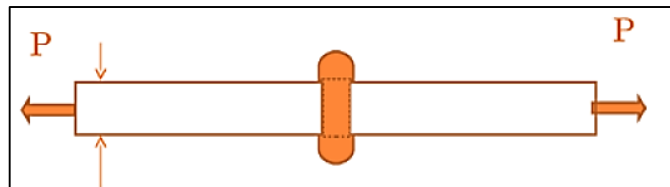
$\theta$ : Ángulo de inclinación.

ff: Factor de fricción.

### 1.8.16 Proceso de soldadura

El 60% de las uniones de las piezas del molino de martillos es mediante procesos de soldadura, para lo cual se utiliza electrodos E-6010 y E-7018.

En procesos de soldadura a tracción, como se muestra en la Figura 12, el esfuerzo es considerado como una carga (P), dividida entre la garganta efectiva de la soldadura, lo cual permite determinar el filete de soldadura.



**Figura 12.** Proceso de soldadura [53].

El área de la garganta es calculada mediante la ecuación 38 [53].

$$t = 0.707 \cdot h \quad (38)$$

**Donde:**

t: Área de la garganta [53].

0.707: Valor constante [53].

h: Alto de garganta [53].

### 1.8.16.1 Esfuerzo de soldadura

Estas resistencias se obtienen mediante la ecuación 39 [54].

$$\sigma = \frac{P}{h \cdot l} \quad (39)$$

**Donde:**

l: Longitud del cordón

P: Carga sobre la soldadura.

h: Altura de la garganta

### 1.8.16.2 Carga de flexión

La carga a flexión se obtiene mediante la ecuación 40 [55].

$$\tau = \frac{P}{0,707 \cdot h_c \cdot L_w} \quad (40)$$

**Donde:**

$L_w$ : Longitud del cordón de soldadura.

P: Carga sobre la soldadura.

$h_c$ : longitud del cateto de la soldadura.

## 1.8.17 Análisis de pernos

### 1.8.17.1 Cálculo de la resistencia a cortante

Sí el plano de corte pasa por la parte roscada del tornillo, la resistencia a cortante  $F_v$

Rd se obtiene mediante la ecuación 41 [56].

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot n}{\gamma Mb} \quad (41)$$

**Donde:**

$F_{v,Rd}$ : Resistencia a cortante.

$f_{ub}$ : Tensión última a tracción del tornillo.

$A_s$ : Área resistente a tracción del tornillo.

$n$ : Número de pernos totales.

$\gamma_{Mb}$ : Coeficiente parcial de seguridad.

### 1.8.17.2 Clases de pernos

En la Tabla 11, se exponen valores de  $f_{yb}$  y de  $f_{ub}$  del acero [56].

**Tabla 11.** Tipos de tornillos.

TIPO	TORNILLOS ORDINARIOS			TORNILLOS DE ALTA RESISTENCIA	
Gado	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb} (N/mm^2)$	240	300	480	640	900
$f_{ub} (N/mm^2)$	400	500	600	800	1000

### 1.8.17.3 Coeficiente parcial de seguridad [56]

$\gamma_{Mb}$ : Resistencia de tornillos 1,25

### 1.8.17.4 Esfuerzo cortante

El esfuerzo axial se obtiene mediante la ecuación 42, en el cuerpo del tornillo debido a la carga  $F$  [57].

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (d_r)^2} \quad (42)$$

**Donde:**

$\sigma$  : Esfuerzo axial

$F$ : carga en el tornillo

$d_r$ : diámetro menor (o raíz)

## 1.9 Tipo de materiales

En la Tabla 12, se detalla el tipo de material a ser utilizado para cada uno de los elementos del molino de martillos.

**Tabla 12.** Tipo de materiales.

<b>Elementos</b>	<b>Tipo de Material</b>
Eje motriz.	Acero de Transmisión Red. 2"
Ejes secundarios.	Acero 705/4340 Red. 25 mm.
Cámara de trituración.	Planchas de Acero 10-10 H, de 12 mm
Tolva.	Planchas de Acero 10-10 H, de 6 mm
Martillos.	Plancha de Acero Bonificado V155 de 15 mm.
Mesa.	Tubo cuadrado de 2" x 3.0
Criba.	Planchas de Acero 10-10 H, de 10 mm
Poleas.	Hierro fundido tipo B, 2 canales.
Motor.	Trifásico de 220V.

## CAPÍTULO II

### 2. CÁLCULO Y DISEÑO DEL MOLINO DE MARTILLOS

En este capítulo se detallan todos los cálculos y diseño de los elementos del molino de martillos, mientras que los elementos que se encuentren normalizados serán seleccionados de catálogos. El material de cada uno de ellos estará afín al diseño.

#### 2.1 Esfuerzo último de la piedra

Este ensayo fue realizado con probetas de Sulfato de Calcio (Yeso) y Mármol, obteniendo como resultado de esfuerzo a la ruptura los siguientes datos:

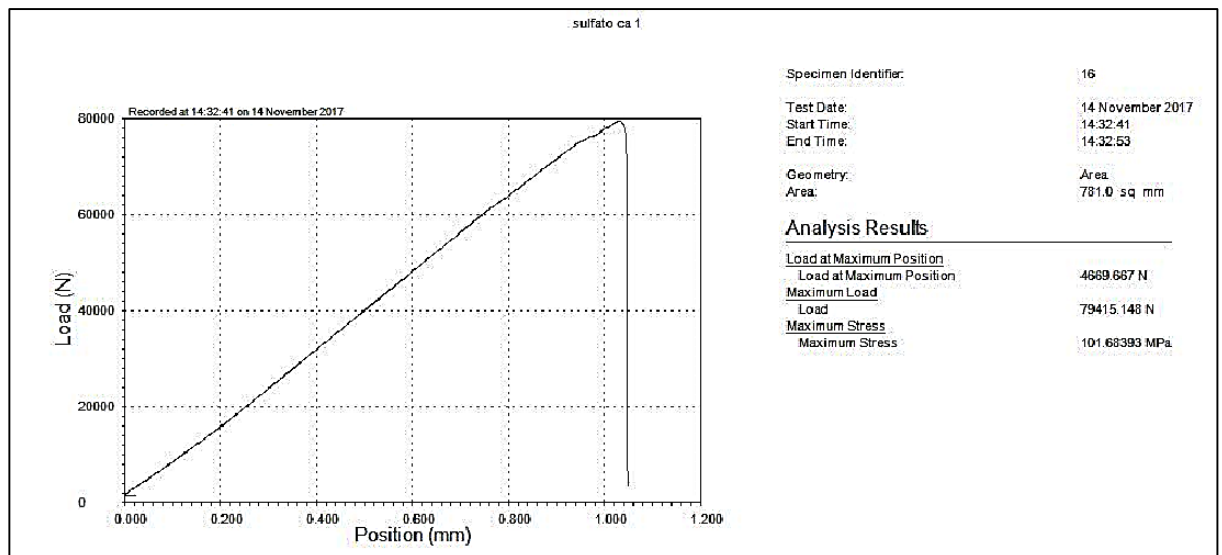
##### 2.1.1 Probetas sulfato de calcio

###### Probeta 1.

$$A_1 = (26.2mm) \cdot (29.81mm)$$

$$A_1 = 781.02mm^2$$

La fuerza aplicada a esta probeta es de 79415.19 N, como se muestra en la Figura 13, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 101.68 MPa.



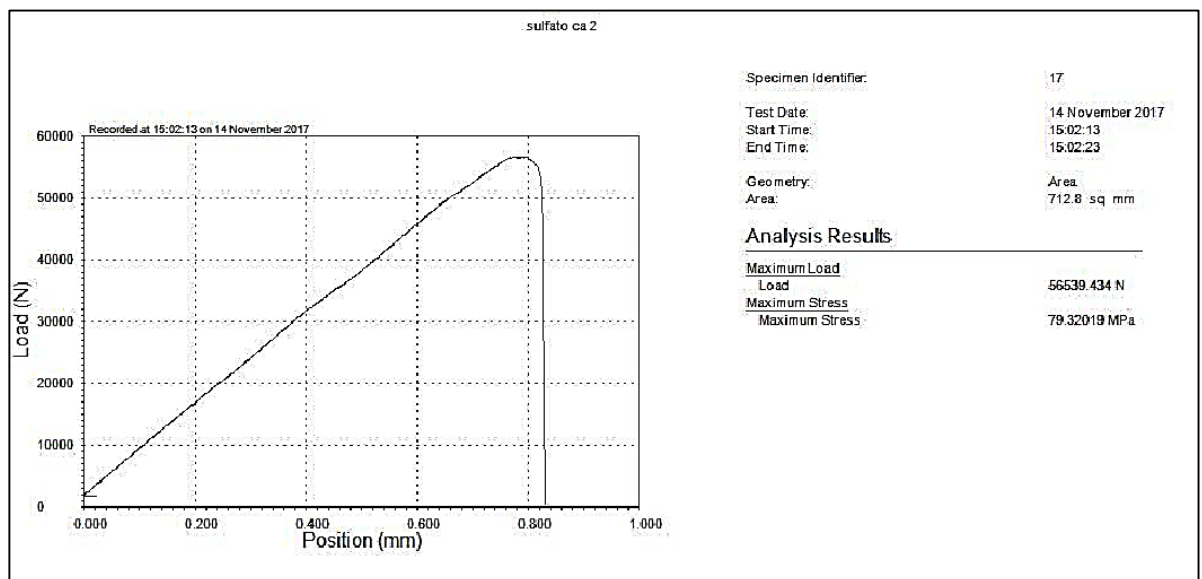
**Figura 13.** Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #1.

### Probeta 2.

$$A_2 = (26.40\text{mm}) \cdot (27\text{mm})$$

$$A_2 = 712.80\text{mm}^2$$

Para la segunda probeta se emplea una fuerza de 56539.43 N, como se muestra en la Figura 14, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 79.32 MPa.



**Figura 14.** Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #2.

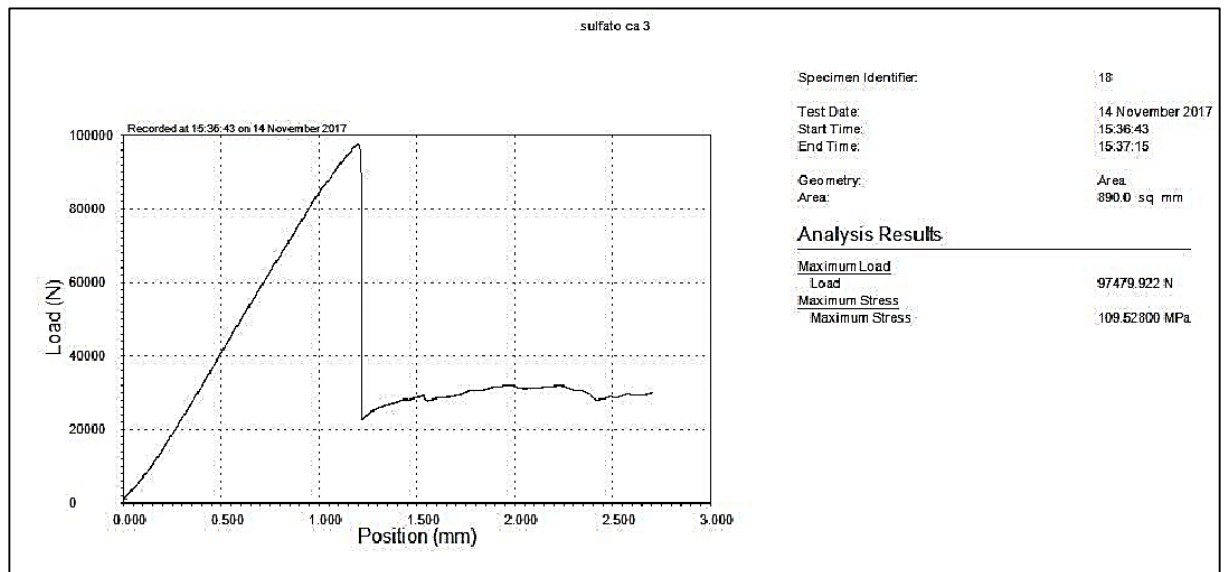


### Probeta 3.

$$A_3 = (35.3\text{mm}) \cdot (25.24\text{mm})$$

$$A_3 = 890.97\text{mm}^2$$

La fuerza aplicada a la tercera probeta es de 97479.92 N, como se muestra en la Figura 15, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 109.53 MPa.



**Figura 15.** Ensayo a la probeta de sulfato de calcio #3.

### 2.1.2 Probetas mármol

#### Probeta 1.

$$A_1 = (30.73\text{mm}) \cdot (29.5\text{mm})$$

$$A_1 = 906.54\text{mm}^2$$

La fuerza aplicada a la primera probeta es de 43817.293 N, como se muestra en la Figura 16, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 48.33 MPa.

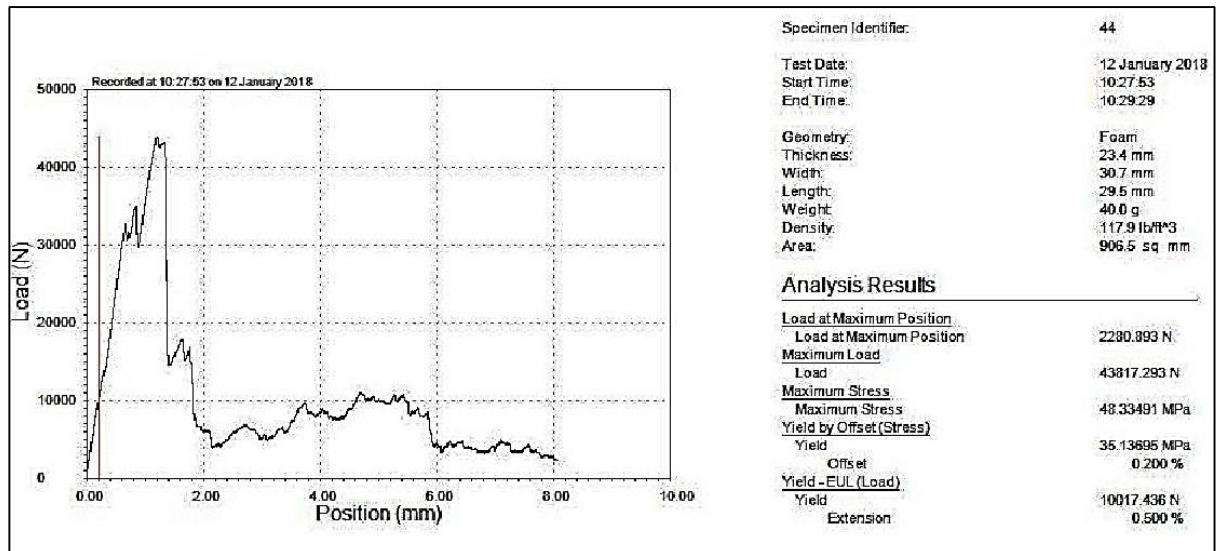


Figura 16. Ensayo a la probeta de mármol #1.

## Probeta 2.

$$A_2 = (30.59\text{mm}) \cdot (30\text{mm})$$

$$A_2 = 917.7\text{mm}^2$$

Para la segunda probeta se aplica una fuerza de 12154.49 N, como se muestra en la Figura 17, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 13.24 MPa.

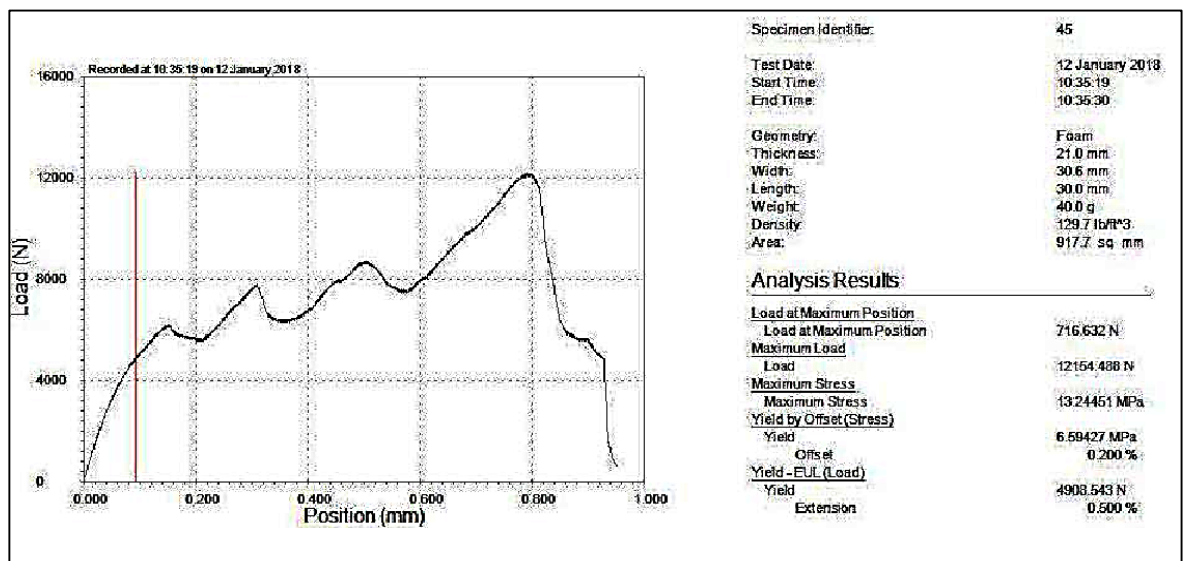


Figura 17. Ensayo a la probeta de mármol #2.

### Probeta 3.

$$A_3 = (30.32mm) \cdot (23.65mm)$$

$$A_3 = 717.07mm^2$$

Se aplica en la tercera probeta una fuerza de 32661.98 N, como se muestra en la Figura 18, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 45.55 MPa.

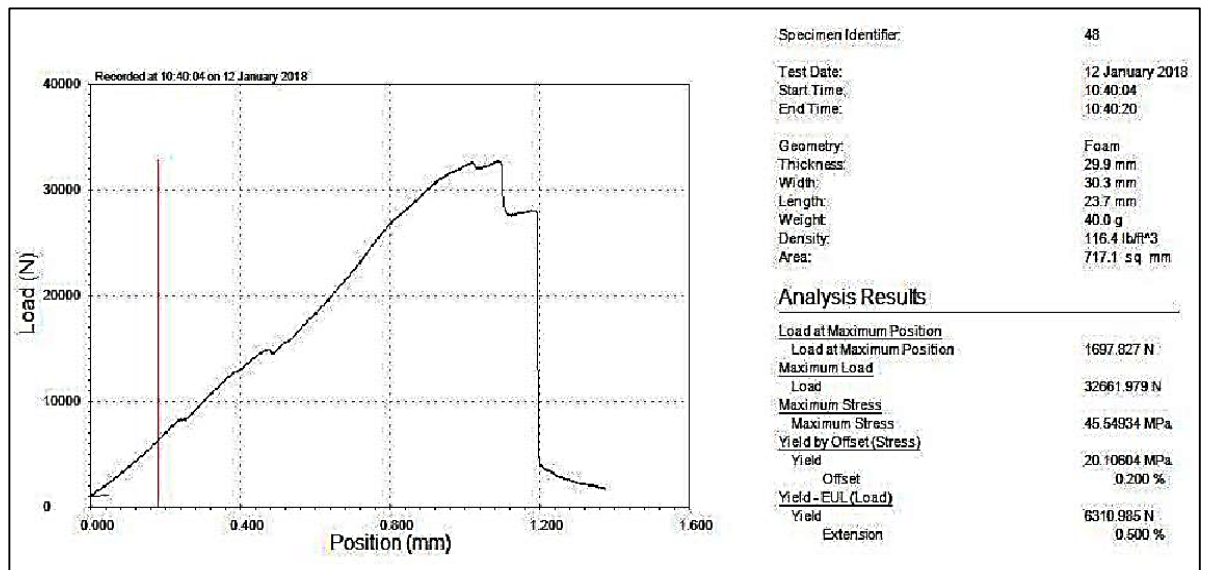


Figura 18. Ensayo a la probeta de mármol #3.

### Probeta 4.

$$A_3 = (29.7mm) \cdot (23mm)$$

$$A_3 = 683.1mm^2$$

La fuerza aplicada en la cuarta probeta es de 60841.79 N, como se muestra en la Figura 19, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 89.07 MPa.

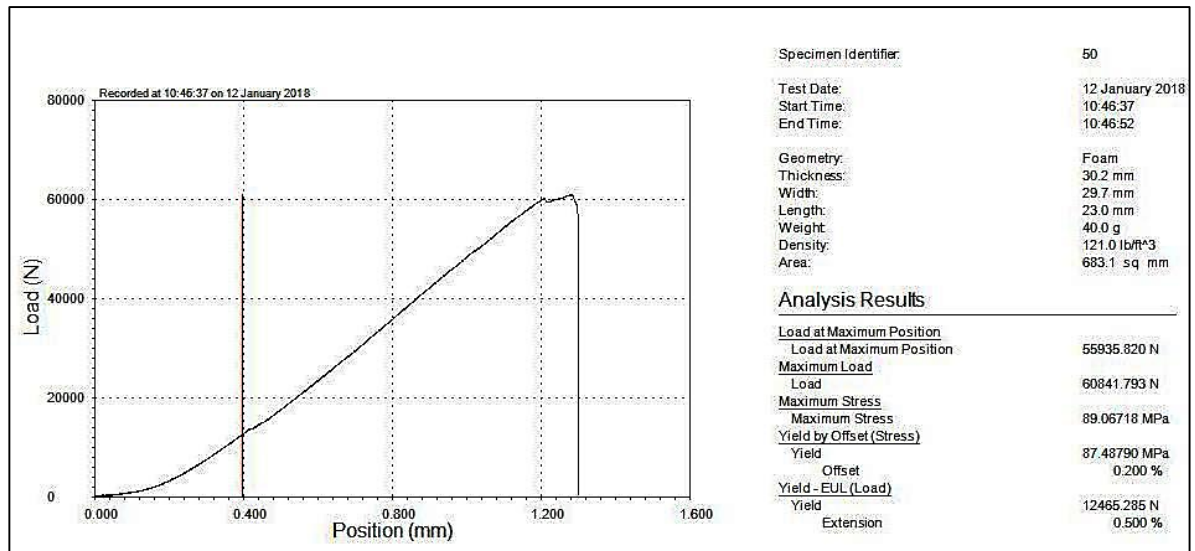


Figura 19. Ensayo a la probeta de mármol #4.

### Probeta 5.

$$A_3 = (30.32\text{mm}) \cdot (24.58\text{m})$$

$$A_3 = 745.23\text{mm}^2$$

Para la quinta probeta se utiliza una fuerza de 94246.09 N, como se muestra en la Figura 20, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 126.46 MPa.

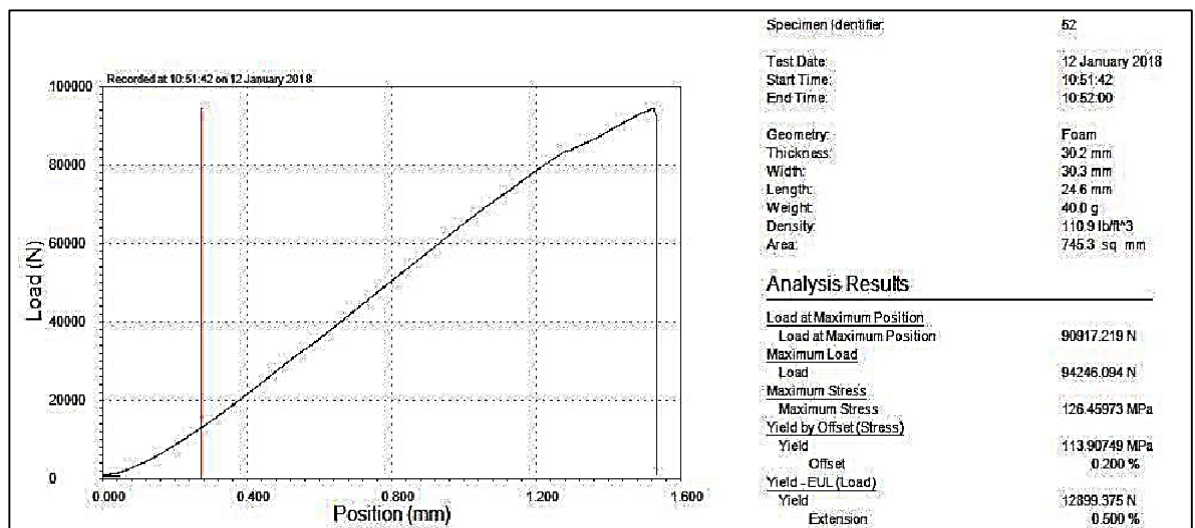


Figura 20. Ensayo a la probeta de mármol #5.

### Probeta 6.

$$A_3 = (30.27\text{ mm}) \cdot (21.46\text{ mm})$$

$$A_3 = 649.59\text{ mm}^2$$

La fuerza aplicada a la sexta probeta es de 38788.02 N, como se muestra en la Figura 21, con lo que se obtiene el esfuerzo máximo de 59.71 MPa.

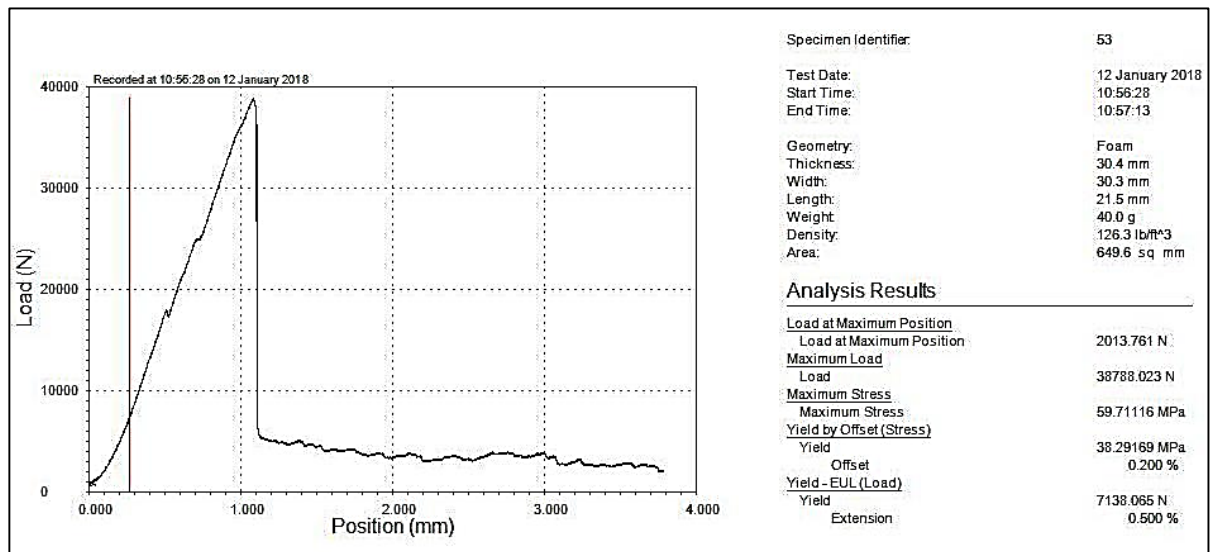


Figura 21. Ensayo a la probeta de mármol #6.

El resultado del esfuerzo a la ruptura de cada una de las probetas de sulfato de calcio y mármol se obtiene mediante la multiplicación del esfuerzo máximo por el factor de 0.6 y se encuentran detalladas en la Tabla 13. Se determina así la de mayor valor para fines de cálculo y diseño del molino.

**Tabla 13.** Resultados esfuerzo a la ruptura de las piedras de mineral pétreo.

Material Pétreo	Probeta #	Esfuerzo Máximo (MPa)	Esfuerzo Cortante
Sulfato de Calcio	1	101.68	61.01
	2	79.32	47.59
	3	109.53	65.79
Mármol	1	48.33	28.99
	2	13.24	7.94
	3	45.55	27.33
	4	89.07	53.44
	5	126.46	75.88
	6	59.71	35.83

## 2.2 Energía necesaria para romper la piedra de mármol

Para determinar la energía necesaria para fracturar la piedra de mármol como se muestra en la Figura 22, se realiza un ensayo en el que a una altura de 2 metros se deja caer una masa en forma de barra de 850 g sobre el mineral pétreo en mención, el cual posee 85 g de masa.



**Figura 22.** Barra de acero con la que se realiza el ensayo.

## 2.3 Capacidad de molienda

La empresa requiere una máquina con capacidad de producción de 15 qq/h o 680 Kg/h, 1 (un) grano de mármol tiene un peso de 2.8 g, con la conversión detallada a

continuación se determina cuantos granos por minuto son necesarios golpear para obtener la capacidad requerida.

$$680 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1000g}{1Kg} \cdot \frac{1grano}{2.8g} \cdot \frac{1h}{60min} = 4047,62 \frac{granos}{min}$$

## 2.4 Cálculo de martillos

Mediante ecuación 2, se determina la velocidad tangencial del martillo donde se utilizan los valores considerados en el ensayo y, de esta forma, establecer la energía necesaria para romper el mineral pétreo.

$$V_t = \sqrt{\frac{m_o \cdot g \cdot h}{m_p}}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{(850gr) \cdot (9.8 \frac{m}{s^2}) \cdot (2m)}{85gr}}$$

$$V_t = 14 \frac{m}{s}$$

Considerando que la velocidad tangencial es semejante a la velocidad de vacío, se reemplazan los valores en la ecuación 3, para obtener la velocidad del molino con carga. El Cs tiene un nivel de 0.015 a 0.025 [57].

$$V_c = -V_v \cdot \frac{C_s - 2}{C_s + 2}$$

$$V_c = -14 \frac{m}{s} \cdot \frac{0.025 - 2}{0.025 + 2}$$

$$V_c = 13,65 \frac{m}{s}$$

Mediante recomendaciones en catálogos especializados se determina que la velocidad angular del rotor de un molino de martillos para molienda de mineral pétreo es de 1750 rpm, valor que se reemplaza en la ecuación 4, para obtener el valor del radio de giro.

$$r_g = \frac{V_c \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot \omega}$$

$$r_g = \frac{(13.65 \frac{m}{s}) \cdot (60)}{2 \cdot \pi \cdot 1750 \text{ rpm}}$$

$$r_g = 0,0750 \text{ m}$$

Para fines de diseño se utiliza un radio de giro total de 0.08m.

Para determinar la velocidad angular con carga se reemplaza en la ecuación 5, los resultados de las ecuaciones 3 y 4.

$$W_c = \frac{V_c}{r_g}$$

$$W_c = \frac{13,65 \frac{m}{s}}{0,08 \text{ m}}$$

$$W_c = 170,63 \frac{rad}{s} = 1629 \text{ rpm} \cong 1700 \text{ rpm} \quad W_v = 178,02 \frac{rad}{s}$$

En cada disco van 4 ejes porta martillos, el ángulo de separación entre ellos será de 90° grados.

$$\theta = 90^\circ = 1,57 \text{ rad}$$

Reemplazando los resultados obtenidos anteriormente en la fórmula 6, se obtiene una aceleración angular.



$$\alpha = \frac{W_v^2 - W_c^2}{2 \cdot \theta}$$

$$\alpha = \frac{(178,02)^2 - (170,63)^2}{(2) \cdot (1,57 \text{ rad})}$$

$$\alpha = 820,55 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Como se observa a continuación se obtiene aproximadamente el número de granos que deberá golpear cada martillo por revolución.

$$\frac{\frac{\text{grano}}{\text{min}}}{w}$$

$$\frac{4047,62 \frac{\text{grano}}{\text{min}}}{1750 \text{ rpm}}$$

$$2,31 \frac{\text{grano}}{\text{rev}} \cong 3 \frac{\text{grano}}{\text{rev}}$$

Para determinar el número de martillos mediante la ecuación 7, se considera un factor de seguridad  $n = 3$  y número de golpes  $\#gt = 2,5$  veces necesarias en las que el mineral pétreo debe ser golpeado para romperse.

$$\#Martillos = \left( \frac{\text{granos}}{\text{rev}} \cdot \#gt \right) \cdot n$$

$$\#Martillos = \left( 3 \frac{\text{granos}}{\text{rev}} \cdot 2,5 \right) \cdot 3$$

$$\#Martillos = 22,5 \cong 23$$

Para fines de diseño se utilizan 24 martillos.

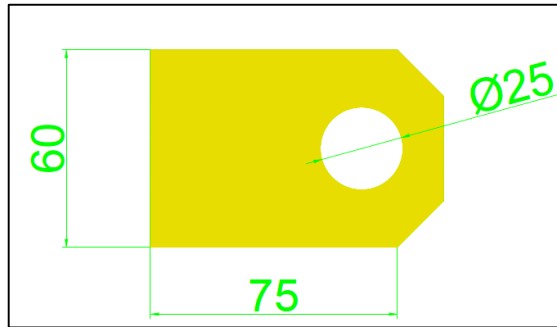
Para validar las dimensiones del martillo es necesario considerar que su volumen debe ser mayor que el del mineral pétreo a triturar. Los valores para calcular el volumen del mármol son obtenidos de la Figura 20 y 23 considerando un espesor de martillo de 15 mm.

$$V_{\text{mármol}} = (24,6 \text{ mm}) \cdot (30,3 \text{ mm}) \cdot (30,2 \text{ mm})$$

$$V_{\text{mármol}} = 22510.48 \text{ mm}^3 \cong V_{\text{mármol}} = 22,51 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{martillo}} = (15 \text{ mm}) \cdot (60 \text{ mm}) \cdot (100 \text{ mm})$$

$$V_{\text{martillo}} = 90.000 \text{ mm}^3 \cong V_{\text{martillo}} = 90 \text{ cm}^3$$



**Figura 23.** Dimensiones del martillo.

La masa del martillo se obtiene sustituyendo las dimensiones de su diseño en la ecuación 8.

$$m_m = a \cdot Pe \cdot e \cdot L$$

$$m_m = 60 \text{ mm} \frac{7,85 \times 10^{-9} \text{ Kg}}{\text{mm}^3} \cdot 15 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}$$

$$m_m = 0,70 \text{ Kg}$$

Mediante la ecuación 9, se obtiene la Fuerza del peso propio que actúa en cada uno de los martillos del molino.

$$\begin{aligned}\sum F &= m_m \cdot a \\ \sum F &= (0,70 \text{ kg}) \cdot \left( 9,8 \frac{m}{s^2} \right) \\ \sum F &= 6,86 \text{ N}\end{aligned}$$

Para determinar la resistencia del martillo mediante falla de cizalladura se procede a calcular el área de desgarre, fuerza centrífuga, esfuerzo cortante y factor de seguridad. Las mismas que corresponden a las ecuaciones 10, 11, 12, 13 respectivamente.

**Área de desgarre.**

$$\begin{aligned}A_d &= e \cdot d_1 \cdot 2 \\ A_d &= (15 \text{ mm}) \cdot (25 \text{ mm}) \cdot (2) \\ A_d &= 750 \text{ mm}^2 \cong A_d = 0,00075 \text{ m}^2\end{aligned}$$

**Fuerza centrífuga.**

$$\begin{aligned}F_{cf} &= \omega^2 \cdot m_m \cdot r_g \\ F_{cf} &= \left( 178,02 \frac{rad}{s} \right)^2 \cdot (0,70 \text{ Kg}) \cdot (0,08 \text{ m}) \\ F_{cf} &= 1774,70 \text{ N}\end{aligned}$$

La fuerza centrífuga corresponde a un solo martillo, por lo tanto, se multiplica por el número de martillos obtenidos anteriormente para obtener la  $F_{cf}$  Total.

$$F_{cf} = (1774,70 \text{ N}) \cdot (24)$$

$$F_{cf} = 42592,80 \text{ N}$$

#### **Esfuerzo cortante.**

$$\tau = \frac{F_{cf}}{A_d}$$

$$\tau = \frac{42592,80 \text{ N}}{0,00075 \text{ m}^2}$$

$$\tau = 85,19 \text{ MPa}$$

#### **Factor de seguridad.**

El factor de seguridad se obtiene considerando que el  $S_y$  para el Acero Bonificado V155 es de 530 MPa [58].

$$\eta = \frac{S_y}{2 \cdot \tau}$$

$$\eta = \frac{530 \text{ MPa}}{(2) \cdot (85,19 \text{ MPa})}$$

$$\eta = 3,11$$

En los martillos se puede producir también fallas por tracción y compresión, por lo cual se procede a calcular el esfuerzo normal y el factor de seguridad. Estas corresponden a las ecuaciones 14, 15 y 16, respectivamente, considerando que el  $S_y$  del material de los martillos es de 530 MPa [58].

$$A_{st} = a \cdot e$$

$$A_{st} = (0,060 \text{ mm}) \cdot (0,015 \text{ mm})$$

$$A_{st} = 9 \text{ m}^2$$

### **Esfuerzo normal.**

$$\sigma = \frac{F_{cf}}{A_{st}}$$

$$\sigma = \frac{42592,80 \text{ N}}{0,0009 \text{ m}^2}$$

$$\sigma = 47,32 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma}$$

$$\eta = \frac{530 \text{ MPa}}{47,32 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 11,20$$

Para determinar la fuerza de corte con la que actúa el martillo es necesario calcular el momento de inercia del martillo y reemplazar los valores obtenidos con anterioridad en la ecuación 17.

### **Momento de inercia del martillo.**

$$I_0 = \frac{1}{12} m_m \cdot d^2$$

$$I_0 = \left( \frac{1}{12} \right) \cdot (0,70 \text{ Kg}) \cdot (0,1 \text{ m})^2$$

$$I_0 = 5,83 \times 10^{-4} \text{ Kgm}^2$$

### **Fuerza cortante.**

Para cada martillo se calcula con la ecuación 18.

$$F_c = \frac{I_0 \alpha}{d}$$

$$F_c = \frac{(5,83 \times 10^{-4} \text{ Kg m}^2) \cdot (820,55 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2})}{0,1 \text{ m}}$$

$$F_c = 4,78 \text{ N}$$

## 2.5 Diseño del disco porta martillos

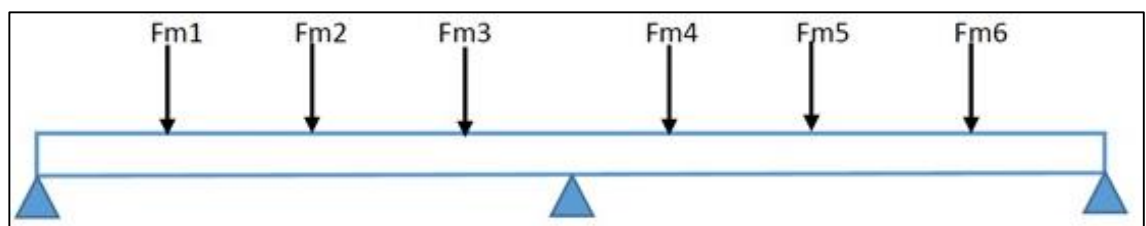
En el diseño de este elemento de la máquina se considera parámetros como: diámetro externo del disco 200 mm, espesor 15 mm, tendrán 4 perforaciones dispuestas a 90° y ejes porta martillos de D = 25 mm.

## 2.6 Cálculo del eje secundario

Este elemento tiene los siguientes datos que ya fueron predefinidos anteriormente como: diámetro de 25 mm construido de acero 705/4340. Se colocan 6 martillos en cada eje secundario. La longitud de los 4 será de 245 mm, estarán uniformemente distribuidos y están soportados por tres discos porta martillos.

### 2.6.1 Diseño estático del eje secundario

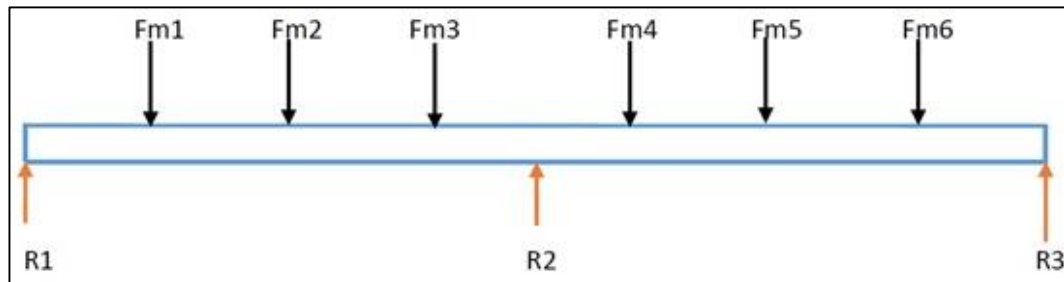
Se indica en la Figura 24, un diagrama detallado del eje, el que se encuentra apoyado en 3 puntos (discos porta martillos), el mismo que soporta la carga de 6 martillos.



**Figura 24.** Diagrama de cuerpo libre – eje porta martillos.

En la Figura 25, se representa las reacciones  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en los apoyos del sistema que son iguales debido a que los discos porta ejes lo son.

Las fuerzas de los martillos ( $F_m$ ):  $F_{m1}$ ,  $F_{m2}$ ,  $F_{m3}$ ,  $F_{m4}$ ,  $F_{m5}$  y  $F_{m6}$  también son iguales ya que son fuerzas centrífugas.



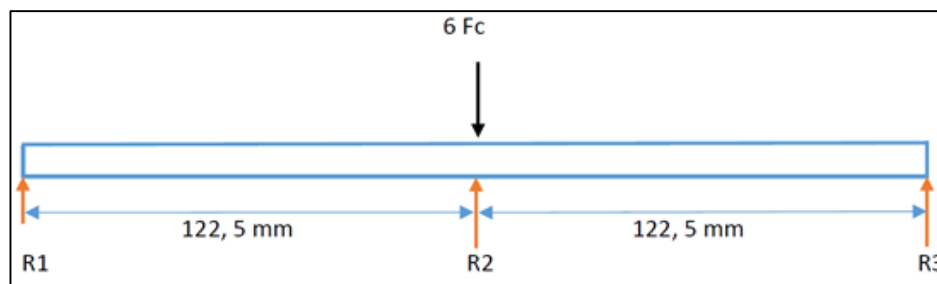
**Figura 25.** Reacciones en los apoyos.

El  $F_s$  del eje secundario, se determina mediante fuerzas y reacciones en los soportes de equilibrio estático del sistema por medio de la ecuación 9 B [45].

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - F_{M1} - F_{M2} - F_{M3} + R_2 - F_{M4} - F_{M5} - F_{M6} + R_3 = 0 \quad (A)$$

Las  $F_c$  son distribuidas equitativamente en el eje como se muestra en la Figura 26 [45].



**Figura 26.** Carga puntual.

$$\sum MR_2 = 0$$

$$R_1(0,1225) - R_3(0,1225) = 0$$

$$R_1 = R_3$$

Del resultado de la ecuación 11, se halla el  $F_{cf}$  y se reemplaza en la ecuación (A) [45].

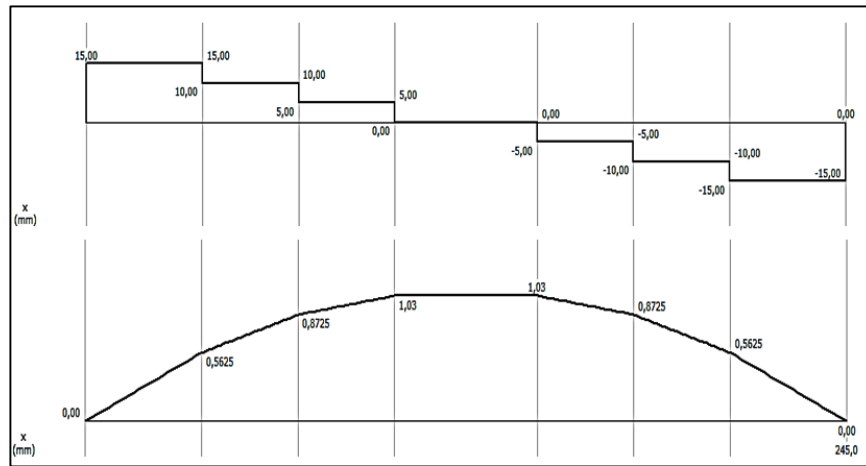
$$R_1 + R_2 + R_3 = 6F_{cf}$$

$$2R_1 + R_2 = 6F_{cf}$$

$$R_1 = 1521,17 \text{ N}$$

$$R_2 = 7605,86 \text{ N}$$

$$R_3 = 1521,17 \text{ N}$$



**Figura 27.** Momentos flectores y cortantes.

Los diagramas de momento flector y cortante indican que el área más crítica en el eje es la parte central con un valor de  $M = 1,03 \text{ Nm}$ , para lo cual se usa la ecuación 19.

$$\sigma = \frac{M \cdot C}{d^3 \cdot \pi}$$

$$\sigma = \frac{1,03 \text{ Nm} \cdot 32}{(0,025)^3 \text{ m}^3 \cdot \pi}$$

$$\sigma = 671,45 \text{ MPa}$$



El  $F_s$  se encuentra mediante la ecuación 20, mencionada anteriormente [45].

$$\eta = \frac{1590 \text{ MPa}}{671,45 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 2,36$$

Factor de seguridad considerado para diseño es de 3, como se detalló anteriormente.

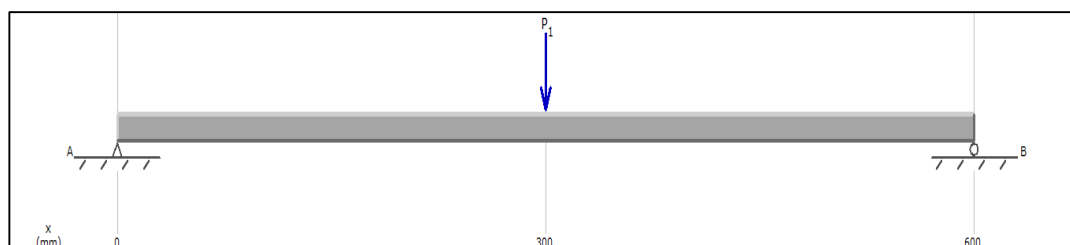
## 2.7 Cálculo del eje motriz

Se analiza las cargas externas como se detalla en la Tabla 14. Así también se analiza los diagramas de momentos flectores y cortantes.

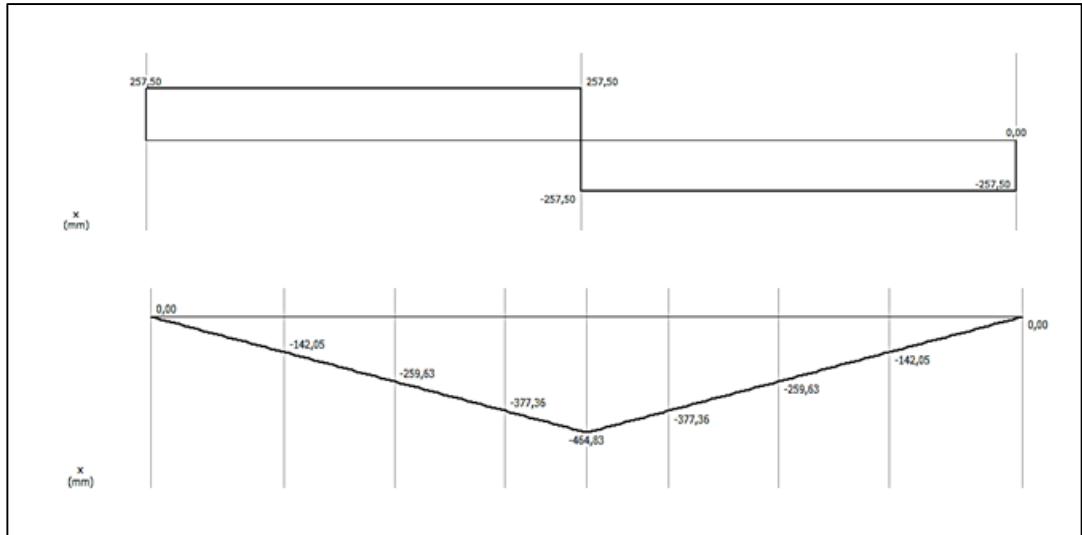
**Tabla 14.** Pesos que soporta el eje principal.

ELEMENTOS	PESO (KG)	CANTIDAD	MASA TOTAL (KG)
Volante de inercia	19.8	1	19.8
Polea	4.83	1	4.83
Martillos	0.5	24	12
Discos porta martillos	4	3	12
Ejes secundarios	0.91	4	3.64
<b>TOTAL</b>			<b>52.3</b>

La carga puntual tiene un peso de 520 N.



**Figura 28.** Eje principal con carga puntual.



**Figura 29.** Diagrama de momentos flectores y cortantes.

El momento flector se calcula mediante la ecuación 21 A.

$$Mf = \sqrt{Mf_{xy}^2 + Mf_{xz}^2}$$

$$Mf = \sqrt{257,5^2 + 464,83^2}$$

$$Mf = 531,38Nm$$

$$Mf = 531387.97Nmm$$

El cálculo se lo realiza para los tres discos obteniéndose como resultado el momento torsor que ejerce el eje principal.  $Mt = 35999767Nmm$ . Este valor se reemplaza en la ecuación 21 B.

$$Mfe = \sqrt{(531387.97)^2 + 0,75(3599767)^2}$$

$$Mfe = 3162453.95Nmm$$

Para el cálculo del diámetro del eje se utiliza la ecuación 22.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 316253,95}{\pi \cdot [1 - (0) \cdot 4] \cdot [27,4]}}$$

$$d \geq 49mm$$

Por lo tanto, el diámetro a usar es de 2 pulgadas o 50,8 mm.

## 2.8 Escogimiento del motor

Se reemplaza el valor de la  $F_c$ , considerando que se multiplica por los 24 martillos y un factor de seguridad de 3.

$$T = F_c \cdot d_1$$

$$T = (4,78N \cdot 24 \cdot 3) \cdot (0,1)$$

$$T = 34,42Nm$$

Mediante la ecuación 29 se obtiene la potencia del motor a utilizar para el funcionamiento del molino de martillos.

$$P = T \cdot W$$

$$P = (34,42Nm) \cdot \left(178,02 \frac{rad}{seg}\right)$$

$$P = 6127,44 W \cong P = 8,21 HP$$

Una vez seleccionado la potencia del motor se calcula mediante la ecuación 30 la potencia de diseño, se considera el factor de servicio para un motor de 10 HP un valor de 1,15 [59]

$$P_d = P_a \cdot F_s$$

$$P_d = (8,21 \text{ HP}) \cdot (1,15)$$

$$P_d = 9,44 \text{ HP}$$

Mediante el cálculo de la potencia de diseño del motor se selecciona un motor de 10 HP, para el óptimo funcionamiento del Molino de Martillos.

**Nota:** La empresa dispone un motor seminuevo de 15 HP el cual fue cedido para el desarrollo de este proyecto.

Con las ecuaciones 31 y 32 se calcula la distancia entre los centros.

$$C_{m\acute{a}x} = 2 \cdot (D_2 + D_1)$$

$$C_{m\acute{a}x} = 2 \cdot (250\text{mm} + 125\text{mm})$$

$$C_{m\acute{a}x} = 750\text{mm}$$

$$C_{m\acute{i}n} = 0,7 \cdot (D_2 + D_1)$$

$$C_{m\acute{i}n} = 0,7 \cdot (250\text{mm} + 125\text{mm})$$

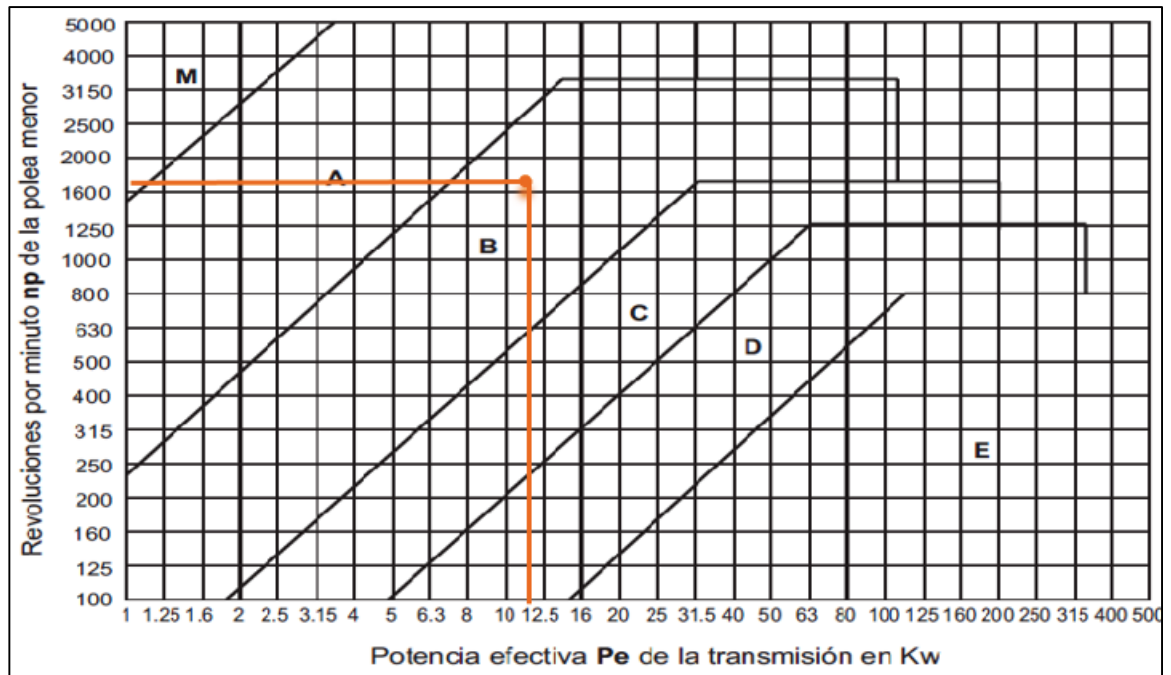
$$C_{m\acute{i}n} = 262,50 \text{ mm}$$

## 2.9 Selección de bandas

El tipo de bandas es seleccionado mediante la Figura 11 del capítulo anterior, allí se aplica el valor de las rpm de la máquina y la potencia del diseño en Kw.

$$rpm = 1750$$

$$P_d = 15\text{HP} = 11,20\text{Kw}$$



**Figura 30.** Selección del tipo de bandas [51].

Como se observa en la Figura 30, mediante la intersección de los parámetros solicitados, las bandas a utilizar son de tipo B.

La distancia de la banda se obtiene mediante la ecuación 33 [39]

$$L = 2 \cdot 60 + 1,57 (250 + 125) + \frac{(250 - 125)^2}{4 \cdot 60}$$

$$L = 1294,69 \text{ mm}$$

El contacto angular sobre la polea se obtiene con la fórmula 34 [39].

$$\alpha = 180 - 57 \left( \frac{250 - 125}{60} \right)$$

$$\alpha = 61,25^\circ$$

El número de bandas se calcula mediante las ecuaciones 35 y 36.

Mediante el ángulo de  $\alpha = 61,25^\circ$  se tiene el  $F_c$  igual a 0,99 [39].

$$P_{bk} = (7,5 + 0,5) HP = 8HP$$

$$P_{efectiva} = P_{bk} \cdot F_{cl} \cdot F_c$$

$$P_{efectiva} = 8HP \cdot 0,95 \cdot 0,99$$

$$P_{efectiva} = 7,5HP$$

$$N_{bandas} = \frac{Pd}{P_{efectiva}}$$

$$N_{bandas} = \frac{15}{7,5}$$

$$N_{bandas} = 2$$

## 2.10 Diseño de la tolva

Para el diseño de la tolva se considera un ángulo de inclinación de  $12^\circ$ , lo que permite reemplazar este valor en la ecuación 37.

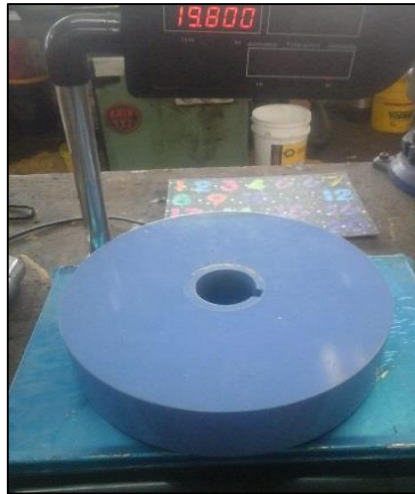
$$\theta = \tan^{-1}(ff)$$

$$(ff) = \frac{12^\circ}{\frac{1}{\tan}}$$

$$(ff) = 0,21$$

## 2.11 Volante de inercia

Para obtener una mejor estabilidad del eje principal y evitar vibraciones, se realiza la instalación de un volante de inercia. Este elemento tiene una masa de 19.8 Kg como se muestra en la Figura 31. Esto se lo realiza para mejorar la durabilidad del eje, aunque no es trascendente para el diseño general.



**Figura 31.** Volante de inercia.

## 2.12 Uniones soldadas

Para realizar las uniones soldadas se utiliza suelda eléctrica con electrodos E6010 y 7018.

El área efectiva de la garganta de soldadura se la obtiene aplicando la ecuación 38.

Donde el filete de soldadura tiene una  $h = 6\text{ mm}$ , valor correspondiente a la Figura 32 de unión entre placa y placa de 10 mm de espesor.

Valores límite de la garganta de una soldadura en ángulo		
Espesor de la pieza (mm.)	Garganta, $a$	
	Valor máximo (mm.)	Valor mínimo (mm.)
4.0-4.2	2.5	2.5
4.3-4.9	3	2.5
5.0-5.6	3.5	2.5
5.7-6.3	4	2.5
6.4-7.0	4.5	2.5
7.1-7.7	5	3
7.8-8.4	5.5	3
8.5-9.1	6	3.5
9.2-9.9	6.5	3.5
10.0-10.6	7	4

**Figura 32.** Valores límites de la garganta de soldadura [56].

$$t = 0,707 \cdot (6mm)$$

$$t = 4,24 \text{ mm}$$

### 2.12.1 Esfuerzo de soldadura

Mediante la ecuación 39, se calcula el esfuerzo que soporta el cordón de soldadura.

Se realiza el cálculo en la parte de la mesa ya que soporta toda la cámara y sus partes.

$$P = 980 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{980N}{6mm \cdot 60mm} = 2,72 \frac{N}{mm^2}$$

### 2.12.2 Carga de flexión

Mediante la ecuación 40, se obtienen los esfuerzos cortantes máximos [55].

$$\tau = \frac{99856 \text{ KN}}{0,707 \cdot 6 \cdot 60}$$

$$\tau = 392,33 \text{ MPa}$$

NÚMERO DE ELECTRODO	RESISTENCIA ÚLTIMA kpsi (MPa)	RESISTENCIA DE FLUENCIA kpsi (MPa)	ELONGACIÓN %
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

**Figura 33.** Resistencia de electrodos [55].



El electrodo a utilizar, según la resistencia a la fluencia calculada y con respecto a la Figura 33, es el E70xx.

### 2.13 Cálculo de pernos

Mediante la ecuación 41, se procede a realizar el cálculo de pernos, realizando análisis en la parte más crítica, es decir entre la mesa base y la cámara de trituración.

Grado del perno es de 6.8, este dato se obtiene utilizando la Tabla 11 del capítulo anterior.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 600 \frac{N}{mm^2} \cdot 157 mm^2}{1,25}$$

$$F_{v,Rd} = 45216 \text{ N}$$

45,21 KN , por perno.

$$d_r = 16 - 2 = 14$$

El esfuerzo axial se lo obtiene aplicando la ecuación 42.

$$\sigma = \frac{4 \cdot 45,21 \text{ KN}}{\pi (14)^2}$$

$$\sigma = 0,30 \text{ KN}$$

Tornillo tipo	Vástago					Cabeza				Area neta del núcleo $A_n$ cm <sup>2</sup>	
	Diámetro de la caña y del agujero a mm	Diámetro exterior de la rosca d mm	Diámetro interior de la rosca d <sub>3</sub> mm	Longitud roscada b mm	Longitud de la salida x mm	Medida entre caras s mm	Medida entre aristas e mm	Radio del acuerdo r mm	Espesor k mm		
TC 10	11	10	8.160	17.5	2.5	7	17	19.6	0.5	0.523	0.580
TC 12	13	12	9.853	19.5	2.5	8	19	21.9	1.0	0.762	0.843
TC 16	17	16	13.546	23.0	3.0	10	24	27.7	1.0	1.440	1.570
TC 20	21	20	16.933	26.0	4.0	13	30	34.5	1.0	2.250	2.750
TC 22	23	22	18.933	28.0	4.0	14	32	36.9	1.0	2.820	3.030
TC 24	25	24	20.319	29.5	4.5	15	36	41.6	1.0	3.240	3.530
TC 27	28	27	23.319	32.5	4.5	17	41	47.3	1.0	4.270	4.590
TC 30	31	30	25.706	35.0	5.0	19	46	53.1	1.0	5.190	5.610
TC 33	34	33	28.706	38.0	5.0	21	50	57.7	1.0	6.470	6.940
TC 36	39	36	31.093	40.0	6.0	23	55	63.5	1.0	7.590	8.170

**Figura 34.** Uniones atornilladas características de los pernos [56].

Mediante la Figura 34, se selecciona el perno M 16 \* 2.

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se detalla el análisis de costos del material y de todas las partes de la máquina normalizadas. También se determina el manual de operación y mantenimiento del equipo.

#### 3.1 Cuantificación de costos del equipo

Se realiza el desarrollo y análisis de cada uno de los costos de materiales que aplica al diseño y fabricación de un molino de martillos para triturar mineral pétreo.

En la Tabla 15 se detalla los costos directos e indirectos para ser estudiados.

**Tabla 15.** Costos directos e indirectos.

Tipo de Costo	Descripción
Costo directo	Material.
	Maquinaria.
	Fabricación.
Costo indirecto	Ingeniería.
	Adicionales.

En la Tabla 16, se detalla los materiales para la fabricación de la máquina para triturar 15 qq/h de mineral pétreo.

**Tabla 16.** Costos de materia prima.

N°	Detalle	Can.	Und.	Cost. Unit. (USD)	Cost. Tot. (USD)
1	Probetas de mármol.	15	Und	5,60	84,00
2	Tubo cuadrado de 2"x2" y 3 mm.	12	m	33,42	66,84
3	Acero Transm. Red. 2 ½"	1	Kg	3,28	3,28
4	Acero Transm. Red. 5"	6,870	Kg	2,80	21,55
5	Acero Transm. Red. 1 ½"	9	Kg	1,84	18,60
6	Acero Transm. Red 2"	11,41	Kg	1,77	20,23
7	Acero Transm. 1020 Red. 203 mm	48,97	Kg	2,96	144,85
8	Acero Transm. Red. 1 ½"	8,36	Kg	1,96	16,36
9	Acero Transm. A36 H 0.5	1,66	Kg	4,40	7,30
10	Acero 705/4340 Red. 25 mm	4,87	Kg	4,58	22,29
11	Plancha 1010 H 65	35,19	Kg	1,60	56,30
12	Plancha 1010 H 12	49,20	Kg	1,50	73,80
13	Plancha 1010 H 10	25,30	Kg	1,50	37,95
14	Plancha 1010 H 6	62,20	Kg	1,50	93,30
15	Varilla para chaveta.	1,00	m	4,00	4,00
16	Acero bonificado V155, 15 mm	15	Kg	2,00	30,00
17	Angulo de 3" x 6 m	1	Und	18,00	18,00
<b>TOTAL</b>					<b>718,65</b>

### 3.2 Costo de elementos normalizados

Como se muestra en la Tabla 17, corresponde a elementos normalizados que son seleccionados bajo catálogo.

**Tabla 17.** Costo de partes normalizadas.

N°	Detalle	Can.	Und.	Cost. Unit. (USD)	Cost. Tot. (USD)
1	Chumaceras KDF de piso 50.8 mm	2	Und	32,98	65,96
2	Polea de hierro fundido 125 mm, tipo B, 2 canales.	1	Und	25,00	25,00
3	Polea de hierro fundido 250 mm, tipo B, 2 canales.	1	Und	72,88	72,88
4	Motor trifásico de 15 HP, 220V	1	Und	400,00	400,00
5	Retenedores de 50.8 mm	2	Und	28,73	57,46
6	Pernos normalizados varios tamaños.	52	Und	0,62	32,24
7	Bandas tipo B de 61"	2	Und	27,00	54,00
8	Caja metálica para conexiones eléctricas.	1	Und	19,97	19,97
9	Contactor trifásico de 60 A.	1	Und	95,00	95,00
10	Relé térmico de 60 A.	1	Und	52,00	52,00
11	Botón de encendido.	1	Und	10,00	10,00
12	Botón de apagado.	1	Und	10,00	10,00
13	Botón de paro de emergencia.	1	Und	10,00	10,00
14	Focos testigo.	2	Und	8,00	16,00
15	Riel DIN.	1	Und	5,00	5,00
16	Bornera.	1		6,00	6,00
17	Cable eléctrico N° 8 acometida.	3	m	7,00	21,00
18	Cable eléctrico N° 12 conexiones.	3	m	2,50	7,50
19	Manguera anillada metálica.	3	m	4,77	14,31
20	Aislantes eléctricos plást.	2	Und	3,00	6,00
22	Micro switch.	1	Und	25,00	25,00

22	Enchufe trifásico de acometida.	1	Und	12,00	12,00
23	Conectores metálicos para manguera anillada.	3	Und	1,34	4,02
24	Amarras plásticas.	1	Paq	5,00	5,00
<b>TOTAL</b>					<b>1026,34</b>

### 3.3 Tiempo de utilización de maquinarias

Son costos que corresponden al tiempo de utilización de maquinarias para realizar los mecanizados de las partes del molino y son detallados en el Anexo 1.

### 3.4 Costo de maquinado

Representa el valor correspondiente a mano de obra y maquinaria necesarias para la construcción del equipo de molienda y son detallados en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Costos de maquinado.

<b>Máquina</b>	<b>Tiempo Utilizado (Hora)</b>	<b>Costo por hora máquina</b>	<b>Costo Total (USD)</b>
Sierra de Cinta.	29,90	5,00	149,50
Plasma.	5,00	6,00	30,00
Cizalla.	2,00	5,00	10,00
Amoladora.	12,55	5,00	62,75
Torno.	19,00	10,00	190,00
Fresa.	22,50	10,00	225,00
Taladro.	12,99	8,00	103,92
Baroladora.	1,00	60,00	60,00
Soldadora.	13,55	5,00	67,75
Compresor.	12,10	3,00	36,30
<b>TOTAL</b>			<b>867,47</b>

### 3.5 Costo indirecto

#### 3.5.1 Costo diseño

Corresponde a la elaboración de cálculos, diseño y planos.

#### 3.5.2 Gastos provisionales

Son costos no planificados y que no afectan el proceso de construcción del molino, estos corresponden a insumos de oficina y movilización.

### 3.6 Costo total de la máquina

En la Tabla 19, se detalla el costo total del molino de martillos.

**Tabla 19.** Costo total de la máquina.

<b>Tipo de Costo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor (USD)</b>
Directo	Materia prima y elementos normalizados.	1744,99
	Costo de mecanizado.	867,47
	Costo de mano de obra.	750,00
Indirecto	Costo de ingeniería	400,00
	Gastos provisionales.	300,00
<b>Costo Total</b>		<b>4062,46</b>

### 3.7 Retorno de la inversión

Para determinar el retorno de la inversión se utiliza el TIR y el VAN, con los datos detallados a continuación:

Nº de períodos: 12 meses.

Tipo de período: mensual.

Tasa de descuento (i): 10%

### 3.7.1 Fondo neto efectivo (FNE)

Como se muestra en la Tabla 20, el fondo neto efectivo se divide en períodos mensuales de 12 meses, lo que corresponde al valor de facturación mensual del año fiscal.

**Tabla 20.** Fondo neto efectivo (FNE).

Nº MES	FNE (USD)
0	-4062,46
1	550
2	550
3	1000
4	1000
5	250
6	270
7	1000
8	750
9	750
10	750
11	750
12	750

### 3.7.2 Valor actual neto (VAN)

Para definir el valor presente de un determinado número de flujos de cajas se calcula el VAN, y sus valores son detallados en la Tabla 21.

Este proyecto es viable porque el VAN de 606 es mayor que 0.



**Tabla 21.** Valor actual neto (VAN).

<b>Nº MES</b>	<b>FNE (USD)</b>	<b>(1+i)<sup>n</sup></b>	<b>FNE/(1+i)<sup>n</sup> (USD)</b>
0	-4062,46		-4062,46
1	550	1,1000	500,00
2	550	1,2100	454,55
3	1000	1,3310	751,31
4	1000	1,4641	683,01
5	250	1,6105	155,23
6	270	1,7716	152,41
7	1000	1,9487	513,16
8	750	2,1436	349,88
9	750	2,3579	318,07
10	750	2,5937	289,16
11	750	2,8531	262,87
12	750	3,1384	238,97
<b>TOTAL</b>			<b>606</b>

### 3.7.3 Tasa interna de rendimiento (TIR)

Para definir la tasa de interés o rentabilidad que ofrece este proyecto se calcula el TIR, y sus valores son detallados en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Tasa interna de rendimiento (TIR).

<b>TASA DE DESCUENTO (%)</b>	<b>TIR (USD)</b>
10%	500,00
10%	454,55
10%	751,31
10%	683,01
10%	155,23
10%	152,41
10%	513,16
10%	349,88
10%	318,07
10%	289,16
10%	262,87
10%	238,97
<b>TOTAL</b>	<b>4.668,62</b>

Obtenemos un TIR de 13% mayor a la tasa de rentabilidad esperada.

#### 3.7.4 PAY-BACK actualizado

En la Tabla 23, se plasma el tiempo en el que se recobra el dinero invertido.

**Tabla 23.** Tiempo de recuperación la inversión.

<b>Nº MES</b>	<b>FNE/(1+i)<sup>n</sup> (USD)</b>	<b>PERÍODO DE RECUPERACIÓN DESCONTADO (USD)</b>
0	(4.062)	(4.062)
1	500	(3.562)
2	455	(3.108)
3	751	(2.357)
4	683	(1.674)
5	155	(1.518)
6	152	(1.366)
7	513	(853)
8	350	(503)
9	318	(185)
10	289	104
11	263	367
12	239	606

La inversión de este proyecto se recupera en el mes número 10.

## CONCLUSIONES

- El tiempo de molienda del mineral pétreo se reduce en 16 horas, esto debido a que antes se realizaba de manera manual y ahora con asistencia mecánica motorizada, mejorando la productividad del proceso.
- A partir de un análisis de alternativas sobre los tipos de molinos, se eligió con un puntaje de 40 puntos, la alternativa 3 que corresponde al molino de martillos, con el cual se diseñó y construyó la máquina.
- Los materiales a ser usados para la construcción de la tolva, cámara de trituración, martillos y criba fueron elegidos mediante un estudio en el que se consideró su resistencia al impacto y peso del material triturado.
- Durante las pruebas realizadas se comprobó que la producción es mayor a la requerida es decir de 15 qq/h a 33 qq/h, trabajando la máquina en óptimas condiciones.
- Mediante el análisis de costos realizado, se determina que el valor del TIR es del 13% y del VAN 606, asimismo en un período de 10 meses se recuperará el dinero invertido.

## RECOMENDACIONES

- Para garantizar el funcionamiento efectivo de la máquina la misma deberá estar encendida 30 segundos sin ingresar material.
- Usar todos los equipos de protección personal para salvaguardar la integridad física de los operarios.
- Realizar la limpieza de la máquina después de cada jornada de trabajo, para prolongar la vida útil de sus partes y de todos los mecanismos.
- Mantener un stock de martillos para reemplazar a los desgastados y no generar tiempos de paro prolongados.
- Disponer de una gama de cribas, cada una de ellas con diámetro diferente para ser intercambiadas de acuerdo a las características de la materia prima.
- Incorporar en la parte inferior de la estructura de la base 4 ruedas para facilitar la movilidad del equipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rotoplas Ecuador, «Rotoplas,» Revista El Agro, [En línea]. Available: <http://rotoplas.com.ec/usos-del-abono-organico/>.
- [2] H. García López , «Los defensores de la Tierra,» 2004. [En línea]. Available: [http://red.ilce.edu.mx/20aniversario/componentes/redescolar/publicaciones/publicaciones\\_publicas/rocas/oto\\_2004/caliza.htm](http://red.ilce.edu.mx/20aniversario/componentes/redescolar/publicaciones/publicaciones_publicas/rocas/oto_2004/caliza.htm).
- [3] Chumaceras Inoxidables, «Solucionamos y representamos,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.solucionamosyrepresentamos.com/chumaceras-inoxidables/>.
- [4] construmatica, «Construmatica,» [En línea]. Available: <https://www.construmatica.com/construpedia/Criba>.
- [5] Diccionario de Arquitectura y Construcción, «Diccionario de Arquitectura y Construcción - Definiciones y traducciones,» [En línea]. Available: <http://www.parro.com.ar/definicion-de-fuerza+de+cizallamiento>.
- [6] K. Muñoz, «Esfuerzos y cargas permisibles,» 02 10 2014. [En línea]. Available: <https://prezi.com/efdbso0bhvvj/esfuerzos-y-cargas-permisibles/>.
- [7] Esacademic, «Universal esacademic,» 2012. [En línea]. Available: [http://enciclopedia\\_universal.esacademic.com/125997/lechada](http://enciclopedia_universal.esacademic.com/125997/lechada).
- [8] Gianella, «cienciafaydi.blogspot,» 19 09 2010. [En línea]. Available: <http://cienciafaydi.blogspot.com/2010/09/metales-metaloides-no-metales-y-gases.html>.

- [9] E. Wanganoff y T. Alsina, «<http://materias.fi.uba.ar>,» 2015. [En línea]. Available:  
[http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06\\_Apunte%20Molienda.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf).
- [10] M. Papadakis, «Medida de la molturabilidad de los materiales y el control de los molinos industriales,» *Materiales de Construcción*, vol. 10, n° 98, 1960.
- [11] N. Ramirez , «proindustriales,» [En línea]. Available:  
<http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/trituracion.html>.
- [12] Dirección General de Desarrollo Minero de México, «Dirección General de Desarrollo Minero de México,» Agosto 2015. [En línea]. Available:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/51927/cp\\_materiales\\_petroos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/51927/cp_materiales_petroos.pdf).
- [13] A. Sánchez, «Agroquímica Sostenible,» Revista Agronomía , 22 05 2015. [En línea]. Available: <http://www.agroquimica.es/sulfato-de-calcio-en-agricultura-usos-en-el-ambito-agronomico>.
- [14] Yesos Especializados de México S.A. de C.V., «Fabricación del Yeso,» [En línea]. Available: <http://www.yesospecializados.com/yeso-fabricacion.html>.
- [15] Ecu Red, [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Sulfato\\_de\\_calcio](https://www.ecured.cu/Sulfato_de_calcio).
- [16] H. Moreno, S. Ibáñez y J. M. Gisbert, «UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA,» [En línea]. Available:  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13682/sulfatos%20revisado%20definitivo.pdf?sequence=3>.
- [17] Cosmos, [En línea]. Available: <http://carbonato-de-calcio.com/>.
- [18] Asturiana de Calcitas, [En línea]. Available: <http://asturcal.es/el-carbonato-de-calcio/>.

- [19] IPNI, [En línea]. Available: <https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/catalog?ReadForm&cat=C>.
- [20] C. J. Guerrero, «Rocas Calizas,» *Temas de Ciencia y Tecnología*, vol. 5, nº 14, p. 9, 2001.
- [21] ARQHYS, [En línea]. Available: <http://www.arqhys.com/arquitectura/marmol.html>.
- [22] V. Pastor. [En línea]. Available: <https://todosobremarmol.com/2013/09/08/el-increible-proceso-de-extraccion-del-marmol-%C2%B7-the-incredible-marble-extraction-process/>.
- [23] Marmolería Ganoa, [En línea]. Available: <http://www.marmoleriagaona.com/marmoles/15-caracteristica->.
- [24] «J&S Importación y Exportación de Piedra Natural,» [En línea]. Available: <http://www.jspiedranatural.com/piedrasnaturales.html>.
- [25] LAPPORTO C.A., [En línea]. Available: <http://www.pageorama.com/?p=www-sulfatodecalcio-com>.
- [26] Diccionario de la Lengua Española, «© Real Academia Española,» 2017. [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/?id=PZkT3CY>.
- [27] J. Alacántara Valladares , «Diseño práctico de un molino de bolas,» 2008. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/107/TESIS+Juan+Ramon+Alcantara+Valladares++MOLINO+DE+BOLAS.pdf?sequence=1>.
- [28] Equitec, «Shanghái Zenith Company,» [En línea]. Available: [http://equitec.com.co/files/maquinaria/molinos\\_de\\_bolas.pdf](http://equitec.com.co/files/maquinaria/molinos_de_bolas.pdf).

- [29] G. Álvarez, «Vista frontal funcionamiento molino de bolas,» [En línea]. Available:  
[http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323/2s06/projects/GerardoAlvarez/proyecto\\_final.html](http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323/2s06/projects/GerardoAlvarez/proyecto_final.html).
- [30] J. Arroyo y M. Medina, «Molienda, equipos, características y operación.,» 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/ivanramma/molienda-1>.
- [31] I. Cuadrado Moncayo y J. Rueda Castillo, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS,» Mayo 2009. [En línea]. Available: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1126/1/91259.pdf>.
- [32] . D. Montoya, «El blog de Déborah Montoya,» 11 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://deborahmontoya.over-blog.es/article-que-para-que-utiliza-molino-bolas-85861912.html>.
- [33] Á. Pizarro Delgado., «Tipos de Trituradoras y Molinos,» [En línea]. Available: <https://1aaditiqigrupob.wordpress.com/2009/10/26/tipos-de-trituradoras-y-molinos/>.
- [34] PROCESAMIENTO DE MINERALES, «PROCESAMIENTO DE MINERALES,» [En línea]. Available: <https://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/molienda-etapas-y-tipos.html>.
- [35] M. A. Arriagada, «Molienda en procesos de área seca,» 6 Agosto 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633>.
- [36] H. Wotruba, «Universidad de Aachen (Aquisgrán), Alemania,» [En línea]. Available: [http://www.gama-peru.org/casm-ica-02/casm-2002\\_h-wotruba\\_ppt.pdf](http://www.gama-peru.org/casm-ica-02/casm-2002_h-wotruba_ppt.pdf).



- [37] D. C. Bermeo Martínez, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS TRITURADOR DE GRANOS PARA GRANJAS AVÍCOLAS,» ESPE, Quito, 2014.
- [38] E. Flórez Solano, C. Clavijo Ovalle y N. Cardona Duarte, «Diseño de un molino de martillos para la producción de pegamento cerámico,» *INGENIO UFPSO - INVESTIGACIÓN*, vol. 07, pp. 19-26, 2014.
- [39] D. C. BERMEO, «repositorio.espe.edu.ec,» mayo 2014. [En línea]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8299/1/T-ESPEL-EMI-0254.pdf>.
- [40] Imec , «Industrial Mecánica,» [En línea]. Available: <http://www.industrialmecanica.com.ar/Molinos.htm>.
- [41] B. M. D. Carolina., «“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS TRITURADOR DE GRANOS PARA GRANJAS AVÍCOLAS”,» ESPE, Quito , 2016.
- [42] GRUBER HERMANOS S. A., [En línea]. Available: <http://www.gruberhermanos.com/descargas.html>.
- [43] J. GERE, *Mecánica de Materiales*, Quinta ed., México: Editorial Thomson, 2002.
- [44] J. A. Pavón, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO ARTESANAL PARA LA MOLIENDA DE GRANOS SECOS DE CAPACIDAD 250 KG/H,» Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6940/1/CD-5195.pdf>.
- [45] C. GUALLICHICO GUANOTOA y F. CABRERA CONTENTO, «CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO MOLIDO DE HUESO DE RES

- CALCINADO PARA SU UTILIZACIÓN COMO ABONO ORGÁNICO,»  
 Febrero 2017. [En línea]. Available:  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13673/1/UPS-KT01351.pdf>.
- [46] R. Hibbeler, Mecánica Vectorial para Ingenieros: Dinámica, Décima ed., México: Pearson, 2004.
- [47] R. L. Mott, DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS, Cuarta ed., México: Pearson, 2006.
- [48] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY, Novena ed., México, Mc Graw Hill, 2012.
- [49] R. C. Juvinall, Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica, Mexico : Limusa, 1996.
- [50] R. L. Norton, DISEÑO DE MÁQUINAS UN ENFOQUE INTEGRAL, Cuarta ed., México: Pearson, 2011.
- [51] REXON, «Cálculo de Transmisiones,» [En línea]. Available:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiQp8eezIncAhXBp1kKHY6HAlsQFghcMAG&url=https%3A%2F%2Frepository.eafit.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2F10784%2F2981%2FANEXO%2520K-Manual%2520Calculo%2520de%2520Transmisi.>
- [52] Indarbelt, «formulas,» [En línea]. Available:  
<http://www.indarbelt.es/html/formulas.htm>.
- [53] C. I. Reina Yanque y W. G. Quitiaquez Sarzosa, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE

- DE CHONTA (FRUTO DE PALMERAS),» 05 2011. [En línea]. Available:  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6028/1/KT00269.pdf>.
- [54] Civilgeeks.com, «Tutorial De Soldaduras,» 28 05 2016. [En línea].
- [55] P. Ringegni, «ingemecanica,» [En línea]. Available:  
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn51.html>.
- [56] Ingeniería Mecánica, «Ingemecánica,» Ingeniería, Consultoría y Formación,  
 [En línea]. Available:  
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html>.
- [57] J. Shigley, El Diseño en Ingeniería Mecánica, México: McGraw-Hill, 2005.
- [58] Serviacero, [En línea]. Available:  
<http://www.serviacero.com/archivos/1368201485.pdf>.
- [59] WEG, «Motor Eléctrico Trifásico,» Brasil, 20113.

# **ANEXOS**

# TIEMPO DE UTILIZACIÓN DE MAQUINARIAS

DESCRIPCIÓN	CANT	SIERRA DE CINTA		PLASMA		CIZALLA		AMOLADORA		TORNO		FRESA		TALADRO		BAROLADORA		SOLDADORA		COMPRESOR	
		H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)	H	I (H)
Mesa base y placas.	15	0,26	3,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,99	0,00	0,00	0,17	2,55	0,14	2,10
Base del motor.	1	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Cámara de trituración inferior.	1	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	1,00	4,00	2,00	2,00	0,00	0,00	3,00	3,00	2,00	2,00
Cámara de trituración superior.	1	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	1,00	4,00	2,00	2,00	0,00	0,00	3,00	3,00	2,00	2,00
Volante de inercia.	1	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Tolva.	1	4,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	1,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	3,00	3,00	2,00	2,00
Criba.	1	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Eje principal.	1	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Eje porta martillos.	4	0,25	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Discos porta martillos.	3	2,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	7,50	1,50	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Martillos.	24	0,00	0,00	0,17	4,00	0,00	0,00	0,08	2,00	0,00	0,00	0,17	4,00	0,17	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tapa porta retenedor.	2	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arandela de eje principal.	2	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cubre bandas.	1	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
TOTAL DE HORAS			29,90		5,00		2,00		12,55		19,00		22,50		12,99		1,00		13,55		12,10

## **MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

### **Instrucciones de Seguridad**

Todo usuario de la máquina debe cumplir con las siguientes recomendaciones de seguridad.

- Usar todo el equipo de protección personal.
- Verificar que la máquina este en perfectas condiciones, no realizar mantenimiento cuando se encuentre en movimiento.
- No utilizar ropa holgada o muy suelta. Se recomiendan las mangas cortas.
- Mantener el lugar siempre limpio.
- Llevar el cabello corto. Si es largo no debe estar suelto sino recogido.
- No vestir joyería, como collares, anillos entre otros.
- Conocer los controles, funcionamiento de la máquina y como detener su operación.
- Recomendable trabajar en un área bien iluminada que ayude al operador.

## Operación de la Máquina

Secuencia de Etapas	Actividad
	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Montar la cámara de molienda sobre la mesa base y colocar pernos de sujeción.</li><li>2. Insertar en el eje principal los discos porta martillos.</li><li>3. Fijar las chumaceras en los extremos del eje principal.</li><li>4. Alternadamente colocar los anillos separadores y los martillos en su respectivo eje.</li><li>5. Montar todo este conjunto en la caja de molienda y sujetar con pernos.</li><li>6. Colocar en uno de los extremos del eje principal el volante de inercia.</li><li>7. Instalar la polea de diámetro de 250 mm en el otro extremo del eje principal.</li><li>8. Colocar la criba en la parte inferior de la caja de molienda con sus respectivos ejes y seguros.</li><li>9. Instalar motor principal con polea de diámetro de 125 mm sobre la mesa base, colocar pernos y tensores respectivamente en las guías.</li><li>10. Colocar y tensar bandas.</li><li>11. Colocar protector de seguridad de bandas.</li><li>12. Instalar sistema eléctrico.</li><li>13. Instalar tolva de alimentación de materia prima dosificada sobre cámara de molienda.</li><li>14. Comprobar sentido de giro del motor.</li><li>15. Conectar la máquina a un tomacorriente de luz eléctrica.</li><li>16. Presionar el botón ON de la caja de control, ubicado en la mesa base.</li></ol>

	<p>17. Ingresar material pétreo por la tolva de alimentación de manera moderada para no producir daños en los mecanismos.</p> <p>18. Al terminar el uso del molino presionar el botón OFF, ubicado en la caja de control.</p>
--	---

### Mantenimiento de la Máquina

Elemento	Actividad
Martillos.	Sustituir los martillos cuando la punta presente desgaste.
Criba.	Sustituir la criba cuando se encuentre desgastada.
Poleas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener un desplazamiento adecuado entre los ejes de las poleas.</li> <li>• Evaluar el estado de los canales, para determinar si existen grietas o superficies aceitosas.</li> <li>• Asegurarse de que los ejes estén centrados y paralelos para garantizar una buena alineación. Se debe situar las chumaceras lo más cerca posible de las poleas.</li> </ul>
Chumaceras.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeccionar visualmente cada mes y realizar limpieza alrededor de las chumaceras para lograr que estén libres de polvo y material pétreo.</li> <li>• Cada 40 horas de trabajo del molino realizar lubricación.</li> </ul>
Motor.	<p>Para motores realizar las siguientes recomendaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener limpio el motor.</li> <li>• Medir periódicamente la resistencia de aislamiento de los</li> </ul>



	<p>devanados.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir periódicamente la temperatura de los devanados, cojinetes y sistema de refrigeración.</li> <li>• Medir los niveles de vibración del motor.</li> <li>• Inspeccionar el sistema de refrigeración.</li> <li>• Inspeccionar todos los accesorios, protecciones y conexiones del motor.</li> </ul>
--	--